

Aus der Klinik und Poliklinik für Physikalische Medizin und Rehabilitation
der Universität München

Vorstand Prof. Dr. med. G. Stucki

Motorisches Lernen und kontralateraler Transfer

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig - Maximilians - Universität zu München

vorgelegt von Eva Hendrich
aus München

2003

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Ernst Pöppel

Mitberichterstatter: Priv. Doz. Dr. R. Blank
Priv. Doz. Dr. A. Danek
Priv. Doz. Dr. B. Sutor

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Dr. Josef Ilmberger

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h. c. K. Peter

Tag der mündlichen Prüfung: 9.10.2003

Inhalt

1. Theoretischer Teil

1.1	Kontrolle von Bewegungen	Seite 1
1.1.1	Motorische Programme	Seite 1
1.1.2	Feedback	Seite 3
1.1.3	Funktionelle Neuroanatomie	Seite 6
1.2	Hemisphärenasymmetrie	Seite 16
1.2.1	Hemisphärenspezialisierung	Seite 16
1.2.2	Die Feedbacktheorie	Seite 17
1.2.3	Die 'Force Variability' Theorie	Seite 18
1.2.4	Das transaktionale Modell	Seite 19
1.3	Motorisches Lernen	Seite 21
1.3. 1	Begriffsbestimmung	Seite 21
1.3. 2	Die Schematheorie	Seite 23
1.4	Kontralateraler Transfer	Seite 25
1.5	Quantitative Erfassung von motorischen Lernleistungen	Seite 26
1.5.1	Methoden zur Untersuchung motorischen Lernens	Seite 26
1.5.2	Das Gesetz von Fitts	Seite 29
1.5.3	Konstante Figurzeit	Seite 31
1.6	Fragestellung	Seite 33

2. Probanden und Methodik

2.1	Auswahl der Aufgaben	Seite 34
2.2	Auswahl und Beschreibung der Versuchspersonen	Seite 36
2.3	Durchführung	Seite 37
2.4	Meßsystem	Seite 38
2.5	Analyse	Seite 49

3. Ergebnisse

3.1	Experiment 1	
3.1.1	Durchführungszeiten	Seite 43
3.1.2	Geschwindigkeitswechsel	Seite 47
3.1.3	Konstante Figurzeit	Seite 50
3.1.4	Korrelation von Durchführungszeiten und Geschwindigkeitswechseln	Seite 53

3.2	Experiment 2	
3.2.1	Durchführungszeiten	
3.2.1.1	Figur 2	Seite 56
3.2.1.2	Figur 3	Seite 60
3.2.2	Anzahl der Geschwindigkeitswechsel	
3.2.2.1	Figur 2	Seite 63
3.2.2.2	Figur 3	Seite 67
3.2.3	Konstante Figurzeit	
3.2.3.1	Figur 2	Seite 69
3.2.3.2	Figur 3	Seite 73
3.2.4	Korrelation von Durchführungszeiten und Anzahl der Geschwindigkeitswechsel	
3.2.4.1	Figur 2	Seite 76
3.2.4.2	Figur 3	Seite 77
3.3	Antworten	Seite 79
3.4	Zusammenfassung der Gruppenergebnisse	Seite 80
3.5	Beispiele motorischen Lernens bei gesunden Probanden	Seite 90
3.6	Beispiele motorischen Lernens bei Patienten	Seite 103
 4. Diskussion		Seite 125
5. Zusammenfassung		Seite 136
6. Literaturverzeichnis		Seite 137

1. Theoretischer Teil

1.1 Bewegungskontrolle

1.1.1 Motorische Programme

Bewegung ist eine grundlegende und scheinbar selbstverständliche Fähigkeit des Menschen, mit seiner Umwelt in Wechselwirkung zu treten. Die bewußte Auseinandersetzung mit Bewegungen geschieht meist erst, wenn eine Bewegung nicht automatisch abläuft, wenn man also z.B. eine komplizierte Bewegung neu erlernt oder durch eine Erkrankung in seinen Bewegungen eingeschränkt ist.

Schon äußerlich einfache Bewegungen, wie z.B. das Zeichnen einer Linie, erfahren eine präzise Abstimmung mehrerer Gelenke und Muskeln, die beim Menschen fast vollständig erlernt werden muß; bei der Geburt sind nur elementare motorische Fähigkeiten angelegt (Prosiegel 1988).

Für die zentrale Vorbereitung von Bewegungen muß daher ein motorisches Programm zur Verfügung stehen (Schmidt 1988). Die meisten unserer Bewegungen enthalten vorprogrammierte Bewegungsschemen (Brooks 1986, Schmidt 1975). Diese Programme können erlernt und auf eine Vielzahl von Situationen angewendet werden, indem sie vom ZNS an die Anforderungen der Umgebung anpaßt werden.

Adams (1971) sowie Henry und Rogers (1960) vertraten die Meinung, daß motorische Fähigkeiten spezifisch sind und sich nur oberflächlich ähneln. Diese Hypothese wurde als 'Specificity of Learning Principle' bekannt und bedeutet, daß es für jede Bewegung ein eigenes Programm geben müßte. Daraus entstanden zwei Probleme hinsichtlich des Verständnisses der motorischen Kontrolle.

Das erste ist das 'storage-problem', also ein Problem des Speicherplatzes, da für die Programme aller Bewegungen, derer wir fähig sind, ein immenser Speicherplatz benötigt würde.

Das zweite ist das 'novelty-problem', also das Problem, daß bereits eine geringe Änderung der Aufgabenstellung ein vollständig neues motorisches Programm verlangt. Dagegen spricht auch, daß auch Bewegungen, die zuvor nicht erlernt oder genetisch festgelegt wurden, ohne weiteres erzeugt werden können.

Als Lösung dieser beiden Probleme wurde ein generalisiertes motorisches Programm, also eine abstrakte Gedächtnisstruktur mit veränderlichen und unveränderlichen Anteilen, vorgeschlagen, die ein Schema darstellt (Schmidt 1975, Shapiro 1977), der damit die 'Variability of Practice' Hypothese begründete.

Dabei bilden die invarianten Programmanteile ein grobes Gerüst, in dessen Rahmen veränderliche Parameter eine flexible Anpassung an die momentanen Anforderungen ermöglichen. Diese These beinhaltet, daß auch das Training der Bewegung variiert werden sollte um den Aufbau eines generalisierten Motorprogramms zu fördern, das auf verschiedene Transfersituationen anwendbar ist (Giuffrida et al. 2002).

Veränderliche Anteile wären z.B. bei einer Unterschrift die Durchführung in verschiedener Größe oder mit verschiedener Geschwindigkeit (i.e. Kraftanwendung) bei jedoch gleichbleibendem relativem 'timing' bezüglich einzelner Bewegungskomponenten.

Der Vorteil dieser potentiellen Variabilität, wie z.B. der Möglichkeit ein Hindernis zu umgehen oder verschiedene Körperteile für die Durchführung zu verwenden, setzt voraus, daß eine Auswahl aus der Vielzahl an möglichen Bewegungen getroffen wird und die 'degrees of freedom' (Bernstein 1967, Enoka 1983) in einer sinnvollen Weise genutzt werden. Allein die räumlichen Freiheitsgrade der verschiedenen Gelenke, die an einer einfachen Bewegung beteiligt sind, ergeben eine kaum überschaubare Anzahl an Möglichkeiten der Bewegungsausführung. Für die Hand einschließlich Handgelenk werden beim Tippen auf einer Tastatur 17 von den 22 tatsächlichen Freiheitsgraden genutzt (Soechting und Flanders 1997). Das ergibt zur Illustration theoretisch (2^{17}), also über 130.000 mögliche Kombinationen. Ohne eine vorherige Auswahl bestimmter Bewegungsvariablen ließe sich kaum erklären, wie diese außerordentlich vielen Freiheitsgrade kontrolliert werden, damit überhaupt eine Bewegung zustande gebracht wird. Daher müßte ein solches motorisches Programm entsprechende Einschränkungen beinhalten, damit nur eine geringe Anzahl von Variablen übrig bleibt, die noch kontrolliert werden müssen. Ein möglicherweise sehr wichtiges Prinzip bei der Auswahl der Bewegungsvariablen ist die zeitliche Invarianz, die zeigt, daß während der Bewegungsplanung die Amplitude einer Bewegung um ein zeitliches Gerüst organisiert wird. Zusätzlich bestehen motorische Programme aus mehreren Untereinheiten, die auch einzeln in neue Motorprogramme einer neuen Aufgaben transferiert werden können (Kharraz-Tavakol et al. 2000). Diese Untereinheiten sind vermutlich hierarchisch organisiert und zeichnen sich auch nach dem Transfer in eine komplexere Aufgabe durch ihre Stabilität aus, d.h. weisen unveränderte invariante Merkmale auf.

1.1.2 Feedback

Die meisten Bewegungen werden ohne bewußte Kontrolle ausgeführt. Es stellt sich die Frage, warum und wann eine Bewegung bewußt kontrolliert wird und wann sie wie automatisch abzulaufen scheint.

Eine Möglichkeit, Bewegungen zu charakterisieren, ist das Ausmaß der verwendeten Rückkoppelung (Feedback). Viele Bewegungen sind, zumindest zum Teil, abhängig von sensorischen Informationen, die von peripheren propriozeptiven Organen, wie z.B. Muskelspindeln, Kapselrezeptoren und Hautrezeptoren oder dem visuellen System zum Cortex geleitet werden. Das Kontrollprinzip solcher Bewegungen nennt man 'closed-loop' (Adams 1971), da die efferenten Anweisungen für die Bewegung wiederholt mit dem afferenten Feedback verglichen werden. Es ergibt sich also ein Feedbackregelkreis. Durch den Vergleich der tatsächlich ablaufenden Bewegung mit der eigentlich geplanten Bewegung können Fehler erkannt und korrigiert werden. Der Vorteil einer solchen Kontrolle liegt darin, daß eine Korrektur während der Bewegung jederzeit möglich ist, falls diese nicht zum gewünschten Ergebnis führt. Diese Bewegungen sind wegen des wiederholten Feedbackabgleichs meist langsam und noch nicht überlernt oder automatisiert.

In Experimenten mit Patienten ohne sensible Afferenz (deafferented patients), z.B. nach bestimmten Rückenmarksverletzung oder bei schwerer sensibler Neuropathie, konnte für kurze Durchführungszeiten bzw. den Beginn einer Bewegung auch an komplexen Bewegungen gezeigt werden, daß diese offenbar ohne Feedback aus der Peripherie durchgeführt werden können (Lashley 1917, Rothwell et al. 1982, Sanes et al. 1985). Im Gegensatz zu closed-loop Bewegungen laufen diese sogenannten open-loop Bewegungen schnell ab und verzichten, zumindest während der Durchführung, weitgehend auf Feedback und Korrekturen. Das ist nur bei gut gelernten Bewegungen realisierbar, welche praktisch ausschließlich vorprogrammiert sein müssen. Darüber hinaus sind die Durchführungszeiten solcher Bewegungen so kurz (weniger als ca. 100-200 msec), daß sensorische Einflüsse aufgrund der Nervenleitungszeit nicht in eine Korrektur umgesetzt werden könnten.

Bewegungen sind natürlich nur selten rein open-loop oder closed-loop kontrolliert, sondern enthalten meist beide Komponenten (Kunesch et al. 1989), so daß man diese Form der Kontrolle als Hybridsystem bezeichnete (Schmidt 1988).

In vielen Arbeiten konnte gezeigt werden, daß Bewegungen oft anfangs schnell und vorprogrammiert ablaufen, um zum Ziel hin eher in einen closed-loop Modus überzugehen. Daher wurde die Einteilung von schnellen Zielbewegungen in mindestens zwei (Woodworth 1899, Welford 1968), eher jedoch in 4 Phasen (T1-T4) vorgeschlagen (Todor und Cisneros 1985). Die Messung der Geschwindigkeitsänderung (Beschleunigung) bei Zielbewegungen veranlaßte die Autoren (Todor und Cisneros 1985) folgende Phasen (Zeiträume) zu unterscheiden: Die Zeit von Beginn der Bewegung bis zum Punkt der maximalen Beschleunigung (T1); die Zeit von T1 bis zur Beschleunigungsumkehr (T2); die Zeit von T2 bis zum Punkt der maximalen negativen Beschleunigung (deceleration) (T3); und die Zeit von T3 bis zum Erreichen des Ziels (T4). Besondere Bedeutung kommt dabei der Phasen T3 (Gutman et al. 1993) und T4 (Todor und Cisneros 1985) zu, da hier die Variabilität am höchsten ist und sich die Unterschiede in der Leistung der Hände am deutlichsten äußern.

Die konkrete Beschreibung von closed- und open-loop Anteilen wird zusätzlich dadurch erschwert, daß auch bei sehr schnellen Bewegungen die Verwendung von Feedback nicht gänzlich auszuschließen ist. Die effektive Verarbeitung von Feedback ist ab einer Zeitspanne von ca. 150 ms für kinästhetisches Feedback und ab ca. 100 ms (Marquardt et al. 1999) bis 140 ms (Keele und Posner 1968, Smith und Bowen 1980, Zelaznik et al. 1983) für visuelles Feedback möglich. Verschiedene Arbeiten (Zelaznik et al. 1983, Hay und Beaubaton 1986, Brenner und Smeets 1997, Marquardt et al. 1999) konnten jedoch zeigen, daß auch bei sehr schnellen Bewegungen (deutlich unter 190 ms, durchschnittlich 100 - 110 ms) visuelles Feedback verwertet und umgesetzt werden kann, insbesondere wenn der Proband damit rechnet, dieses Feedback zu erhalten. Das spricht nicht gegen die Existenz von Motorprogrammen. Teil eines solchen Programms dürfte die Verwertung des gebotenen Feedbacks mit möglichst wenig Zeitverlust sein (Zelaznik et al. 1983, Ivens und Marteniuk 1997). Schwierig ist zu unterscheiden, ob eine Leistungsverbesserung Ergebnis der Beobachtung der vorhergehenden Bewegung oder der Verwendung von Feedback während der Bewegung ist.

In einer Studie über Zielbewegungen (Elliott et al. 1995) wurde den Probanden zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beginn der Bewegung das visuelle Feedback entzogen. Um mehr Zeit zur Verwendung des Feedbacks in der 'homing-in' Phase zu gewinnen absolvierten Probanden die ersten Phasen einer Bewegung schneller, wenn sie vorher wußten, daß ihnen das visuelle Feedback entzogen werden wird. Daraus schloßen Elliott et al. (1995), daß in den motorischen Programmen auch Anweisungen für die effiziente Verwendung des verfügbaren Feedbacks enthalten sind. Schmidt (1988) schlug vor, daß Feedback auf zwei Arten verwendet werden kann: Es könnte helfen, Fehler bei der Auswahl des richtigen Motorprogramms zu korrigieren und/oder Fehler während einer Bewegung zu minimieren.

Entsprechend konnten Marquardt et al. (1999), im Gegensatz zu Ergebnissen von van Galen et al. (1994), die eine Verlangsamung der Bewegung nach entzogenem visuellem Feedback beschreiben, bei Verzerrung des visuellen Feedback oder Verschieben des Zielpunktes eine sehr kurzfristige (100 ms bzw. 200ms) Korrektur der open-loop Bewegung durch eine weitere open-loop Bewegung darstellen. Die unterschiedlichen Ergebnisse dürften darauf zurückzuführen sein, daß in der Studie von van Galen et al. (1994) und anderen nicht gewährleistet wurde (z.B. durch kinematische Analyse), daß tatsächlich open-loop Bewegungen untersucht wurden und die von van Galen et al. (1994) untersuchten Bewegungen von über 300 ms vermutlich nicht open-loop gesteuert sind. Insbesondere trifft das auf Studien zu, die die Genauigkeit der Bewegung betonen, da diese Anweisung zu einer weitgehend oder vollständig visuell kontrollierten (closed-loop) Bewegung führt.

Hinsichtlich der visuellen Kontrolle wurde schon 1968 von Trevarthen, später auch von Freund (1986) eine mehr qualitative Unterteilung von Bewegungen gefordert. Sie schlugen vor, Bewegungen an Hand der qualitativen Verwendung des visuellen Feedbacks einzuteilen. Ungelernte oder schwierige Bewegungen werden visuell sehr eng kontrolliert (focal vision), wohingegen überlernte automatisierte Bewegungen in einer Art visuellem Überblicksmodus (ambient vision) ablaufen. Freund (1986) hat diese Einteilung weiter konkretisiert und beschreibt zwei Typen von Bewegungen.

Bewegungen vom Typ I sind langsam und werden mit den Augen genau verfolgt. Sie sind auf detailliertes Feedback durch foveale Fixation oder den Tastsinn angewiesen, ihre Durchführungszeiten sind lang und variieren deutlich.

Dagegen sind Typ II Bewegungen schnelle (über 2 Hz), überlernte Bewegungen, die unter visueller Ganzfeldkontrolle ablaufen.

Einige Untersuchungen bestätigen diesen Sprung von glatten Trackingbewegungen (der Augen) zur visuellen Ganzfeldkontrolle. Die Möglichkeit ein bewegtes Ziel kontinuierlich zu fixieren endet für repetitive Bewegungen bei einer Grenze von etwa 1 Hz (Mather und Puchat 1983, von Noorden und Mackensen 1962) bis 2 Hz (Leist et al. 1987). Kommerel und Klein (1971) beschreiben eine ähnliche Art der visuellen Kontrolle von schnellen Bewegungen, die sie 'off-foveal stabilized retinal image' nennen. Somit müssen visuell gesteuerte closed-loop Bewegungen von open-loop Bewegungen unterschieden werden, die ebenfalls durch visuelles Feedback korrigiert werden können, jedoch nicht primär visuell gesteuert sind (Marquardt et al. 1999).

1.1.3 Funktionelle Neuroanatomie

Die neuronale Organisation zur Planung und Ausführung einer Bewegung stützt sich, wie experimentell nachgewiesen werden konnte, auf ein Netzwerk parallel arbeitender kortikaler und subkortikaler Strukturen (Fries 1997).

Der folgende Abschnitt soll eine kurze Übersicht über die motorischen Systeme und deren Funktion geben.

Die Einleitung und Durchführung jeglicher Bewegung unterliegt den motorischen Zentren des ZNS. Ihre Aufgabe ist laut Schmidt und Wiesendanger (1985), die Motoneurone der entsprechenden Muskulatur so zu erregen, daß die Muskelkontraktion genau zu der gewünschten Bewegung führt. Bewegungen können jedoch nur erfolgreich ausgeführt werden, wenn durch eine angemessene Haltung des Körpers und der Extremitäten die für diese Tätigkeit notwendige Ausgangsposition eingenommen wird. Darüber hinaus muß der Körper dem durch die Bewegung entstehenden Ungleichgewicht entgegenwirken. Obwohl die Stütz- und Zielmotorik funktionell sehr eng miteinander verbunden sind, ist diese Unterscheidung sinnvoll, da auch durch die zentrale Organisation den sogenannten motorischen Zentren vorwiegend Zielbewegungs- oder Haltefunktionen zugeordnet werden können (ventromediales oder laterales

System). Während die Stützmotorik und ihre Koordination mit der Zielmotorik überwiegend von Strukturen des Hirnstammes und Kleinhirns kontrolliert werden, ist zur Durchführung von Zielbewegungen eine Beteiligung höherer Zentren erforderlich.

Diese motorischen Zentren erstrecken sich über verschiedene Abschnitte des ZNS von der Hirnrinde bis zum Rückenmark und unterliegen einer ausgeprägten, entwicklungsgeschichtlich bedingten, hierarchischen und parallelen Ordnung.

Es lassen sich verschiedene Ebenen motorischer Funktionen unterscheiden (Hikosaka 2002). Neben der ersten Ebene, die angeborene Bewegungen ausführt, ist eine zweite Ebene zu nennen, die hochautomatisierte Bewegungen generiert, die durch längere Übung erworben wurden. Eine dritte Ebene kontrolliert Bewegungen mit bewußter Aufmerksamkeit, die bisher nicht erlernt wurden, oder die bewusst durchgeführt werden.

Neuere Erkenntnisse über neuroanatomische Korrelate des motorischen Lernens sind Ergebnis von Untersuchungen mit PET, EEG, Tiefenelektroden, transcranieller Magnetstimulation (TMS) oder insbesondere mit funktionellem MRI. Es zeichnet sich ab, daß korrespondierend zu verschiedenen Phasen und Ebenen des motorischen Lernens auch verschiedene Hirnareale aktiviert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Konzepte und der unterschiedlichen motorischen Aufgabenstellung der einzelnen Studien ist ein Vergleich nur zum Teil möglich.

Im frontalen Cortex, direkt rostral des primärmotorischen Areals, wurden mehrere voneinander getrennte motorisch relevante Areale identifiziert.

Der prämotorische Cortex ist aus verschiedenen funktionellen Zonen zusammengesetzt. Besonderes Interesse verdient das supplementärmotorische Areal (SMA), das aufgrund seiner unterschiedlichen Funktionen und Verbindungen zu anderen Hirnarealen in das PräSMA (ventraler Abschnitt) und SMA proper (dorsaler Abschnitt) unterteilt wird (Rizzolatti et al. 1996). Dieses Areal wurde bereits von Deecke (1969) mit dem Bereitschaftspotential in Verbindung gebracht, das als Aktivierung des SMA im Rahmen der motorische Planung der Aktivierung des primärmotorischen Areals (Richter et al. 1997) und damit der Bewegung vorangeht. Das SMA ist an der Selektion, Vorbereitung, Initiation, Ausführung und der Feedbacküberwachung sowie am motorischen Lernen (Hikosaka et al. 1999) und an der Planung komplexer und sequentieller Bewegungen beteiligt (Lee 1999, Passingham 1996, Cunnington et al. 1996). Dabei scheint das PräSMA, das über

Verbindungen zum prämotorischen und primärmotorischen Cortex verfügt, durch Selektion und Präparation eines motorischen Programmes in den Anfangsstadien der Planung und des motorischen Lernens (Nakamura et al. 1998, Lee et al. 1999) komplexer Bewegungen (Boecker 1998) sowie intern getriggelter Bewegungen (Deiber et al. 1999) involviert zu sein. Während der Durchführung einer Bewegung (Lee et al. 1999) und im späteren Fortschritt des Lernens übernimmt die SMA proper, die über Verbindungen zum primärmotorischen Areal und über direkte spinale Projektionen verfügt, die Initiation der Bewegung und wirkt zusammen mit dem primärmotorischen Areal an der Ausführung des motorischen Programms mit (Lee et al. 1999). Das SMA proper ist eher bei einfachen bzw. bei bereits erlernten beteiligt (Pickard 1996). Zusätzlich entsteht bei einfacheren Aufgaben eine Aktivierung nur kontralateral, bei komplexeren Aufgaben meist eine bilaterale Aktivierung (Kawashima 1998). Als Anteil der striatocorticalen Verbindungen scheint dem SMA (mit dem Striatum, dem Thalamus und Anteilen des frontalen Cortex) auch eine wesentliche Bedeutung am Timing einer Bewegung zuzukommen, z.B. der Reproduktion von erinnerten Rhythmen (Rao et al. 1997). Zeitlich noch vor der Aktivierung des PräSMA zeigt sich bei komplexen Bewegungen, die eine interne Selektion benötigen (Pickard und Strick 1996) eine Aktivierung des dorsalen Anteils des rostralen Gyrus cinguli (Cinguläres motorisches Areal, CMA). Diese Aktivierung nimmt, wie im SMA, bei selbstgetriggerten Bewegungen zu (Deiber et al. 1999) und zeigt bei zunehmender Komplexität eine rechtshemisphärische Betonung (Sadato et al. 1996). Korrespondierend dazu wurde eine Aktivierung des SMA und des CMA auch beim Visualisieren von Fingerbewegungen beobachtet (Deiber et al. 1998, Stephan et al. 1995).

Der ventrolaterale prämotorische Cortex ist besonders in der Planung von sequentiellen Aufgaben sowie dem Greifen und Manipulieren von Objekten involviert (Grafton et al. 1996, Gruenewald et al. 2000). Er scheint, wie der motorische Cortex, somatotopisch organisiert zu sein, wie eine Studie über die Antizipation sequentieller visueller und auditorischer Stimuli zeigte (Schubotz und von Cramon 2001). Die Aktivierung nimmt mit der Komplexität der sequentiellen Aufgabe zu, wobei schon die Beobachtung sequentieller Abläufe im Sinne einer Vorhersage ohne motorische Anforderung eine Aktivierung auslöst.

Das dorsale prämotorische Areal wird bei komplexen unilateralen Bewegungen beidseits aktiviert mit einer Betonung der kontralateralen Hemisphäre (Jenkins et al. 1994, Sadato 1996), bei einfachen Aufgaben mehr contralateral (Rizzolatti et al. 1987 und Tanji 1988 et al. an Affen).

Die grundlegende Funktion der kognitiven Kontrolle wurde der Interaktion des präfrontalen Cortex mit anderen Hirnregionen zugeschrieben (Miller et al. 2000).

Der ventrale präfrontale Cortex ist involviert in die automatische Kontrolle von Verhalten (Fuster 1989), der anteriore Anteil insbesondere in affektives und zielgerichtetes Verhalten (Cummings 1993) sowie in das Erlernen von Sequenzen einer kognitiven Aufgabe (Koechlin et al. 2002). Der anteriore mediale präfrontale Cortex hat Verbindungen zum ventralen Striatum, das mit der Einschätzung einer zu erwartenden Belohnung beim Erlernen einer motorischen Aufgabe in Verbindung gebracht wird (Schultz et al. 1997). Im zeitlichen Zusammenhang bestehen Aktivierungen des orbitofrontalen und ventralen präfrontalen Cortex zusammen mit lateralen cerebellären Anteilen bei unbewußter Anpassung von Bewegungen (Stephan et al. 2002).

Der dorsale präfrontale Cortex und das anteriore cinguläre Areal (Area 32 und 24) zeigen eine Aktivierung während des motorischen Lernens einer neuen Aufgabe, wenn die Probanden entscheiden, was zu tun ist (Jüptner et al. 1997), und wurde deshalb mit kontextbezogenen Gedächtnisleistungen und bewußter Verhaltenskontrolle in Verbindung gebracht. Zusätzlich konnte auch während bewußter Aufmerksamkeit bei der Durchführung einer bereits automatisierten Bewegung eine Aktivierung im linken präfrontalen Cortex und dem rechten anterioren cingulären Areal dargestellt werden (Jüptner et al. 1997, Rowe et al. 2002). Während der direkten Aufmerksamkeit für eine Bewegung entsteht eine Aktivierung des dorsalen präfrontalen Cortex, die eine Verbindung zum prämotorischen Cortex aufweist (Rowe et al. 2002). Die Effekte der Aufmerksamkeit im präfrontalen Cortex scheinen direkten und indirekten Einfluß (über den parietalen Cortex) auf den prämotorischen Cortex zu haben und das Ausmaß der Beeinflussung des prämotorischen Cortex durch den parietalen Cortex zu bestimmen (Rowe et al. 2002). Gleichzeitig lassen sich bei bewußter Bewegungsplanung Coaktivierungen des anterioren cingulären Areals und des posterolateralen Cerebellum darstellen. Der dorsale präfrontale Cortex wird daher mit der bewußten Aufmerksamkeit und Antizipation an einer Bewegung (Doyon et

al.1996), bzw. der Bewußtwerdung einer motorischen Aufgabe in Verbindung gebracht (Grafton et al. 1995). Dies trifft nicht zu für dual-task Aufgaben mit geteilter Aufmerksamkeit während einer durchgeführten Bewegung oder bei nichtmotorischen Aufmerksamkeit (Fletcher et al. 1998). Eine Aktivierung des dorsolateralen präfrontalen Cortex (und des PräSMA) entsteht in der frühen Phase des motorischen Lernens (Sakai et al. 1998) und geht später mehr auf den parietalen Cortex über. Wie das SMA bekommt auch der präfrontale Cortex über pallidothalamische Verbindungen Einflüsse vom Striatum, die als wesentlich angesehen werden für Timingaufgaben (Meck 1996).

Der parietale Cortex zeigt Aktivierungen sowohl bei der Vorstellung als auch bei der Durchführung von Handbewegungen (Stephan et al. 1995, Deiber et al. 1998). Die Region entlang des intraparietalen Sulcus ist sowohl mit internen Körperrepräsentationen räumlicher Bewegungen (Bonda et al. 1995) als auch mit räumlichem und nicht-räumlichem Arbeitsgedächtnis (Coull und Frith 1998) assoziiert. Während des späteren motorischen Lernens von gezielten Handbewegungen zeigen sich Aktivierungen entlang des Sulcus intraparietalis und Præcuneus (Sakai et al. 1998). Der superiore Parietallappen wurde mit perceptiven Aspekten einer motorischen Aufgaben (Grafton et al. 1992) sowie mit Aufmerksamkeit bei der Verarbeitung räumlicher Anforderungen in Verbindung gebracht (Coull und Frith 1998).

Der posteriore parietale Cortex zeigt eine Aktivierung bei trainierten visuomotorischen Greifbewegungen (Kawashima et al. 1995) und Schreibbewegungen (Seitz et al. 1997), und wurde insbesondere mit der visuomotorischen Koordination von Handbewegungen in Verbindung gebracht (Desmurget und Grafton 2000). Seitz et al. (1997) schrieben diesem Areal wurde die Umwandlung visueller Stimuli in körperzentrierte Koordinaten zu. Spezifisch konnte gezeigt werden, daß der posteriore parietale Cortex den Aufbau der internen Repräsentation der aktuellen Handposition und der dynamischen Berechnung von Abweichungen der Hand- und Zielposition gewährleistet (Desmurget et al. 1999). Zusätzlich wurden im Tierversuch unterschiedliche Areale des Parietallappens sowohl für positionsbezogene als auch für bewegungsbezogene Formen der Tiefenwahrnehmung identifiziert (Sakata et al. 1997). In Anbetracht der Tatsache, daß Bewegungstrajektorien in räumlich-visuellen Koordinaten geplant werden (Wolpert et al. 1995), sind Anteile des

Parietallappens vermutlich auch in die visuelle Ganzfeldkontrolle hochüberlerner Bewegungen involviert (Seitz et al. 1997) und spielen möglicherweise auch eine Rolle für die Selektion bzw. Deselektion interner Repräsentationen durch das Cerebellum (Iacoboni 2001). Insbesondere die dem 'forward model' inhärente Fähigkeit efferente und afferente Signale für Korrekturen noch während schneller Bewegungen umzusetzen (Desmurget und Grafton 2000) dürfte eine der wesentlichen Funktionen des Parietallappens sein.

Eine wichtige Rolle des cerebralen Cortex ist eine gemeinsame Repräsentation zu bieten, auf die das Cerebellum und die Basalganglien projizieren (Doya 2000).

Während der Durchführung einer Bewegung besteht für beide Hände im primärmotorischen Cortex neben der kontralateralen Aktivierung eine weniger ausgeprägte ipsilaterale Aktivierung, die für die dominante Hand sehr schwach ist (van Mier et al. 1998). Die ipsilaterale Aktivierung könnte darauf beruhen, daß etwa 10-15% der Fasern des Tractus corticospinalis lateralis nicht kreuzen. Der primärmotorische Cortex zeigt während der Planungsphase der Bewegung nur wenig Aktivierung, starke Aktivierung dagegen während der eigentlichen Bewegungsdurchführung (Richter et al. 1997), die für Bewegungen mit hoher Geschwindigkeit zunimmt (van Mier et al. 1998). Es scheint eine frühe Phase des motorischen Lernens zu geben, die einen sehr schnellen Lernerfolg zeigt und eine spätere Phase der Konsolidierung des Erlernten, die mehrere Stunden (min. 6-8h) nach dem Training andauert (Karni et al. 1998). Die lange Konsolidierungsphase nach dem Training entspricht vermutlich der Zeit, die für neuronale Prozesse benötigt wird, i.e. der Plastizität des motorischen Cortex entspricht und langfristige Struktur- und Verhaltensänderungen mit sich bringt (Karni et al. 1998). In dieser Zeit zeigt sich die für das motorische Lernen typische Verlagerung der Hirnaktivierung vom präfrontalen motorischen Cortex zum prämotorischen Cortex, posterioren parietalen Cortex und kortikalen cerebellären Abschnitten (Shadmehr und Holcomb 1997). Dieser 'shift' der Aktivierung entspricht vermutlich den Veränderungen der neuronalen internen Repräsentation einer Bewegung, die zu einer langfristigen Stabilität des motorischen Programms führt (Shadmehr und Holcomb 1997) und betont die Rolle des primärmotorischen Cortex für die Verarbeitung und Speicherung motorischer Informationen (Muellbacher et al. 2002). An Ratten konnte gezeigt werden, daß die langfristige Potenzierung die neuronale Basis für motorisches Lernen darstellt (Rioux-Pedotti et al. 2000).

Korrespondierend dazu konnte an Menschen nach einer initialen Verkleinerung des aktivierten Areals nach vier Wochen täglichen Trainings eine Verbreiterung des aktivierten Handareals im primärmotorische Cortex nachgewiesen werden (Karni et al. 1997), die sowohl auf einer Langzeitpotenzierung als auch auf einer tatsächlichen Zunahme der Synapsen beruht (Kleim et al. 2002).

Die Funktion der Basalganglien während des motorischen Lernens ist die adäquate Selektion von Bewegungen und Muskeln und deren Efferenz an kortikale Strukturen (Jueptner und Weiller 1998). Sie stellen einen komplexen Zusammenschluß von subkortikalen Strukturen dar, die unter dem Einfluß von mehreren Cortexarealen über den Thalamus wieder zurück an motorische kortikale Areale projizieren. Es wurden mindestens vier basalganglien-thalamocorticale Schleifen identifiziert, die die Basalganglien mit dem motorischen Cortex, dem oculomotorischen Cortex, dem präfrontalen Cortex und dem limbischen System verbinden (Alexander und Crutcher 1990). Insbesondere die prämotorische Schleife ist involviert in sequentielles motorisches Lernen (Hikosaka et al. 1995), wohingegen die motorische Schleife mehr der Ausführung von Bewegungen dient (Nakamura et al. 1998). Entsprechend vermittelt der dorsale Globus Pallidus bei intern getriggerten Bewegungen Information über die Bewegungssequenz an das SMA, der ventrale Globus Pallidus dagegen motorische Parameter an den primärmotorischen Cortex (Middleton und Strick 2000). Visuomotorische Aufgaben werden über die (dorsolaterale) präfrontale Schleife schneller erlernt als durch die motorische Schleife. Demgegenüber kann die erlernte sequentielle Bewegung über die motorische Schleife schneller und verlässlicher ausgeführt werden, sobald sie einmal erlernt ist (Nakahara et al. 2001). Dadurch, daß die Basalganglien das SMA mit dem lateralen prämotorischen Cortex verbinden (Hoover und Strick 1993) spielen sie eine wesentliche Rolle bei der Planung komplexer Bewegungen (Boecker et al. 1998), indem die parallel arbeitenden prämotorische und motorische Schleife durch die PräSMA koordiniert werden (Nakahara et al. 2001). Die Basalganglien sind spezialisiert auf Lernen durch Belohnung, die auf dopaminvermittelte Belohnungssignale aus der Substantia nigra basiert (Doya 2000). Die Bewegung mit dem höchsten Belohnungspotential wird in der Substantia nigra (Pars reticulata) und dem Globus pallidus selektiert und an die motorischen Kerne des Hirnstamms und an die thalamo-corticalen Verbindungen weitergeleitet. Das nigrostriatalen

System beeinflusst über Dopaminrezeptoren die Übertragung im corticostriatalen Systems und bewirkt so langfristiges Lernen (Graybiel 1998). Entsprechend führt im Tierversuch (an Primaten) eine temporäre Blockade des anterioren Striatum (assoziatives Areal) zu Defiziten im motorischen Lernen und die Blockade des posterioren Striatum zu Defiziten bei der Ausführen einer Bewegung (Miyachi 1997). Der Beitrag des Striatum und des dopaminergen nigrostriatalen Systems ist notwendig für der Aufbau und den Abruf der motorischen Programme, wobei nicht klar ist ob diese im Cortex oder in den Basalganglien erstellt werden (Matsumoto et al. 1999). Ein Mechanismus der Basalganglien die Fülle der angebotenen Informationen zu verarbeiten scheint die Zerteilung in mehrere Untereinheiten (chunks of information) zu sein (Miller 1956). Über eine schrittweise Anpassung und Neuordnung der gebündelten Einheiten im Striatum wird eine effiziente Repräsentation aufgebaut, die die Freiheitsgrade einschränkt und zur Automatisierung der Bewegung führt (Graybiel 1998). An Affen (Kermadi und Joseph 1995) konnte der Beitrag des Nucleus caudatus zur zeitlichen Planung räumlicher Bewegungen gezeigt werden, insbesondere in Bezug auf die Abfolge der Ziele (Sequenz). Dies deutet darauf hin, daß die Basalganglien dazu beitragen, die nächste Bewegung vorherzusehen und zu planen (Marsden 1987). Der Nucleus ruber links wird bei der Planung selbstinitiiert Bewegungen aktiviert (Cunnington et al. 2002). Er ist Ursprung des Tractus rubrospinalis und beeinflusst gemeinsam mit dem corticospinalen Trakt die Motoneurone, die die Muskeln ansteuern. Er steht unter dem Einfluß des SMA, primärmotorischen Cortex, cingulären Cortex und insbesondere des Cerebellum (Burman et al. 2000).

Das Cerebellum hat hinsichtlich des Timing der motorischen Kontrolle und des motorischen Lernens eine wichtige Funktion bei der Einschätzung der Zeitdauer und der Geschwindigkeit einer Bewegung, sowohl extern (visuell) als auch intern (Ivry 1997). Diese Fähigkeit der Vorhersage und Vorbereitung motorischer Ereignisse (Courchesne et al. 1997) gehen also über rein motorische Aufgaben hinaus (Ivry und Hazeltine 1995). Es bestehen offenbar mehrere bilaterale Zeitgeber, die in einem gemeinsamen Output münden, da Studien an einseitig cerebellär geschädigten Patienten (Franz et al. 1996) und gesunden Probanden (Helmuth und Ivry 1996) darauf hindeuten, das ein Zusammenwirken beider Hemisphären der einzelnen Aktion einer Hemisphäre in beiden Probandengruppen überlegen ist (Ivry 1997).

Das anteriore Cerebellum ist an der Erinnerung (Gedächtnisleistung) einfacher Rhythmen involviert, wohingegen das posteriore Cerebellum bei der Reproduktion komplexer Rhythmen und zusammen mit dem PräSMA die Anpassung des Timing an externe Trigger übernimmt (Sakai et al. 2000). Die Ergebnisse einer cerebellären Aktivierung während der Phasen des motorischen Lernens und sind z.T. widersprüchlich. Eine Aktivierung des ipsilateralen anterioren Cerebellum ist bei einfachen Fingerbewegungen (ohne Lernvorgang) und bei frühem Lernen bilateral gemeinsam mit dem Vermis zu erkennen (Müller et al. 2002). Bei fortgeschrittenem Lernen besteht eine Aktivierung hauptsächlich im ipsilateralen Cerebellum sowie weniger auch im Vermis und kontralateralen Cerebellum (Müller et al. 2002). Ebenso fanden (Seitz et al. 1994) mehr Aktivierung während der Durchführung erlernter Bewegungen bilateral im Cerebellum und im Vermis, der Nucleus dentatus war dagegen in der Lernphase aktiv. Demgegenüber zeigen Studien von Friston et al. (1992) und Jenkins et al. (1994) eine höhere Aktivierung in Anfangsstadien des motorischen Lernens wo. In einer Studie von Toni et al. (1998) bestand ebenfalls mehr Aktivierung des Vermis und des ipsilateralen anterioren Cerebellum in frühen Stadien des Lernens mit einer Abnahme der Aktivierung im kontralateralen anterioren Cerebellum im Verlauf des Lernens. Jenkins et al. (1994) schlug vor, daß das Cerebellum auch bei automatisierten Bewegungen eine Rolle spielt, was von Passingham et al. (1995) bestätigt wurde. Bei fortgeschrittenem impliziten Lernen konnte von Doyon et al. (1996) eine Aktivierung des Cerebellum und Striatum nachgewiesen werden. Die verschiedenen Studien sind vermutlich sowohl aufgrund der unterschiedlichen motorischen zeitlichen Komplexität, als auch aufgrund der nur unscharfen Definition von „frühen und späten“ Lernphasen schwierig zu vergleichen. Eine Theorie von Imamizu et al. (2000) könnte jedoch die widersprüchlichen Ergebnisse erklären. Sie konnten in ihrer Studie eine fehlerbezogene Aktivierung des Cerebellum in früheren motorischen Lernstadien entdecken sowie eine Aktivierung in späteren Lernstadien, die nicht auf der Detektion von Fehlern basieren konnte (weil diese nicht mehr vorhanden waren), und die sie einer internen Repräsentation (internes Modell) von Bewegungen zuschrieben. Diese These könnte über eine Abnahme der fehlerbasierten Aktivierung und eine Zunahme der modellbasierten Aktivierung des Cerebellum während des Lernverlaufs die unterschiedlichen und scheinbar widersprüchlichen Ergebnisse

früherer Studien erklären. Das feedback- oder fehlerbasierte Lernen des Cerebellum basiert vermutlich auf der langfristiger Unterdrückung von Einflüssen der Kletterfasern auf die Purkinjezellen (Doya 2000).

Vermutlich ist das Cerebellum solange aktiv, bis die unterschiedlichen Möglichkeiten einer zu planenden Bewegungen ausreichend eingeschränkt sind und es nicht mehr notwendig ist die Bewegung gezielt zu überwachen. Dies entspricht einem wesentlichen Prinzip des motorischen Lernens und der Automatisierung einer Bewegung. Allgemein ist anzunehmen, daß das Cerebellum hauptsächlich in frühere Lernstadien involviert ist und nicht für die Retention oder Speicherung zuständig ist. Darüber hinaus scheint das Cerebellum auch bei bereits automatisierten Bewegungen wieder aktiviert zu werden, wenn erneut vermehrt Feedback benutzt wird. Die Beteiligung des Cerebellum an kognitiven Funktionen war lange umstritten. Obwohl Ivry (1997) eine Beteiligung des Cerebellum an kognitiven Prozessen mit guten Argumenten in Frage stellte existieren inzwischen mehrere Studien, insbesondere von Middleton und Strick (2000), die die kognitiven Funktionen des Cerebellum anatomisch und physiologisch genau beschreiben. Der Output des Cerebellum über den Nucleus dentatus zeigt eine topische Organisation. Der laterale Nucleus dentatus projiziert Informationen extern gesteuerter Bewegungen zum ventralen prämotorischen Areal und ist beim motorischen Lernen entscheidend beteiligt. Der dorsale Nucleus dentatus und der Nucleus interpositus projizieren über den ventrolateralen Thalamus zum primärmotorischen Areal und wurden mit der Ausführung von Bewegungen assoziiert (Middleton und Strick 2000). Zusätzlich hat der Nucleus dentatus für das Wiederfinden bei der Auswahl erlernter Sequenzen eine wesentliche Bedeutung, nicht aber für reines Lernen (Hikosaka 2002). Hinsichtlich des motorischen Lernens wurden Unterschiede zwischen der Funktionsweise der Basalganglien und des Cerebellum beschrieben. Im Gegensatz zu den Basalganglien verarbeitet das Cerebellum sensorisches Feedback um das Ergebnis der passiven oder aktiven Bewegung zu überwachen (Jueptner und Weiller 1998).

1.2 Hemisphärenasymmetrie bei motorischen Leistungen

1.2.1 Hemisphärenspezialisierung

Es gilt als weitgehend gesichert, daß Bewegungen einer Körperseite überwiegend von der jeweils kontralateralen Hemisphäre gesteuert werden. Ebenso ist es unumstritten, daß bei den meisten Menschen eine Lateralisation der motorischen Funktionen entsteht und die dominante Hand bei einer Vielzahl von Aufgaben geschickter ist. Daraus kann man schließen, daß die beiden Hemisphären des Gehirns offenbar für unterschiedliche Aufgaben eine gewisse Spezialisierung entwickelt haben. Es gibt eine Vielzahl von Arbeiten über die Lateralisierung von Fähigkeiten und die Faktoren, die, wie z.B. das Geschlecht (McGlone 1980), wahrscheinlich Einfluß auf die Hemisphärenspezialisierung haben.

Das Überwiegen der Rechtshändigkeit der Menschen ist transkulturell und man kann davon ausgehen, daß die Hemisphärendominanz, die sich auch anatomisch nachweisen läßt (Strauss et al. 1983), zum Teil genetisch determiniert wird bzw. angeboren ist (Geschwind 2002). Die Lateralisierung von Hirnfunktionen beginnt sehr früh und konnte bereits an Kleinkindern zwischen 5 und 12 Monaten gezeigt werden (Holowka und Petitto 2002).

Viele Probleme zur cerebralen Asymmetrie sind jedoch bisher unbeantwortet (Kuhn 1986). Die linke Hemisphäre wird meist als ein linguistisch, linear, logisch und sequentiell arbeitendes System beschrieben, während die rechte Hemisphäre als ein mehr räumlich, automatisch, synthetisch und eher holistisch arbeitendes System charakterisiert wird (Cohen 1973).

Diese Beschreibungen sind sicher sehr vereinfachend und besagen wenig über die konkrete Arbeitsweise der Hemisphären.

Ein interessanter Ansatz zur Hemisphärenspezialisierung stammt aus Untersuchungen an hirngeschädigten Patienten. Semmes (1968) schlug vor, daß die Funktionseinheiten der linken Hemisphäre eher fokal, die der rechten mehr diffus repräsentiert seien. Als Erklärung der kausalen Zusammenhänge schlägt die Autorin vor, daß die bessere Verarbeitung von komplexen Prozessen (wie feinmotorischen Bewegungen) durch die linke Hemisphäre auf deren Fähigkeit zur Integration von Teilvorgängen mit hoher Ähnlichkeit beruht. Demgemäß führt die diffuse Repräsentation elementarer Leistungen in der rechten Hemisphäre zu einer besseren Integration von unähnlichen Teilvorgängen und gestattet daher im

einzelnen solche Handlungen, die ein multimodales Zusammenwirken benötigen, wie z.B. Handeln in räumlichen Dimensionen.

Es gibt jedoch bislang keine allgemein anerkannte Theorie über die Lateralisierung motorischer Funktionen.

Das mag daran liegen, daß Studien über die Hemisphärenspezialisierung schwer zu vergleichen sind, weil unterschiedliche Aspekte und Bewegungen (i.e. Aufgaben) zur Untersuchung herausgegriffen werden oder untersuchte Läsionen unterschiedlich lokalisiert sind.

Darüber hinaus bestehen eventuell von vornherein Vorteile einer Hemisphäre bei bestimmten Bewegungen oder der Verarbeitung des verwendeten peripheren Feedbacks. Allein die Versuchsplanung kann daher durchaus zur besseren Leistung einer Hand führen (Haaland und Harrington 1989), so daß nur ein Teil der einflußnehmenden Faktoren differenziert werden kann.

Als Erklärung für Hemisphärenunterschiede bei der Durchführung von Bewegungen diskutiert Carson (1989) im wesentlichen zwei Theorien, die er als Feedback-Theorie und Force-Variability-Theorie bezeichnet.

1.2.2 Die Feedbacktheorie

Die Feedback-Theorie besagt, daß sich die Hemisphären in der Effizienz, mit der sie das verfügbare Feedback verarbeiten, unterscheiden (Todor und Doane 1978, Cohen 1973, Flowers 1975, Todor und Cisneros 1985), also in einer Spezialisierung hinsichtlich der sensorischen Verarbeitung und nicht der Durchführung einer Bewegung. Zugrunde liegt dieser Annahme, daß die linke Hemisphäre besser sequentielle, die rechte besser parallele Informationen verarbeiten kann (Cohen 1973). Trotz der wesentlichen Bedeutung der verwendeten sensorischen Informationen zur Kontrolle von Bewegungen enthielten die Aufgaben der meisten durchgeführten Studien keine räumliche Komponente als adäquate Aufgabe für die rechte Hemisphäre (Guiard et al. 1983).

Eine Überlegenheit der linken Hand bezüglich der Genauigkeit der Bewegungsprogrammierung wurde bei räumlichen (Roy und MacKenzie 1978) und taktilen Aufgaben (Bradshaw und Nettleton 1981) gezeigt. Roy et al. (1994) fanden, auch ohne visuelles Feedback, einen Vorteil der rechten Hand während der Verlangsamungsphase (deceleration). Sie schlossen daraus, daß dieser Vorteil

also nicht auf visuelles Feedback zurückzuführen ist, und die Beurteilung des visuellen Feedbacks somit nicht notwendigerweise zur Klärung der Hemisphärenunterschiede beiträgt.

Kimura (1977) und Lomas (1980) fanden in ihren Studien einen Vorteil der linken Hemisphäre beim Programmieren von sequentiellen Aufgaben.

Der vermutete Vorteil beim Verarbeiten des sequentiellen Feedbacks könnte dann während der Durchführung von Bedeutung sein. Diese Vermutung würde jedoch den Vorteil der rechten Hand bei sehr schnellen (unter 120 msec) sequentiellen Bewegungen (Peters 1980) nicht erklären, bei denen eine ausgiebige Nutzung des Feedbacks wegen der physiologisch begrenzten Nervenleitgeschwindigkeit nicht wahrscheinlich ist.

1.2.3 Die 'Force Variability' Theorie

Die zweite Theorie wurde wesentlich von Peters geprägt. Peters (1980) sowie Todor und Smiley-Oyen (1987) konnten bei der Untersuchung eine höhere Variabilität der Richtungswechsel der nichtdominanten Hand bei kurzen, schnellen Bewegungen feststellen und entwickelten die Theorie, daß der Hauptgrund der besseren Leistung der dominanten Hand die höhere Präzision in der Kraftanpassung ist. Dies deckt sich mit Untersuchungsergebnissen bezüglich der 'homing-in' Phase an langsamen und schnellen Bewegungen, mit und ohne visuellem Feedback, von Annett et al. (1979, Todor und Cisneros 1985,) und wurde als Force Variability Theorie bekannt. Dabei konnte gezeigt werden, daß die nichtdominante Hand sowohl ungenauer als auch etwas langsamer war, da sie in der "Positionierungsphase" deutlich mehr Korrekturbewegungen benötigte.

Hammond (1990) dagegen konnte belegen (Hammond und Bolton 1982), daß sich zwar die bekannten Leistungsunterschiede, aber kaum Anhaltspunkte für eine unterschiedliche Kraftentwicklung der Hände ergeben, die die höhere Variabilität der nichtdominanten Hand erklären würden.

Zwei Studien von Roy und Elliott (1986 und 1989) zu ballistischen Bewegungen (kürzer als 200 ms) können weder die Feedback-Theorie noch die Force-Variability-Theorie unterstützen. In diesen Untersuchungen war die rechte Hand bei hohen Geschwindigkeiten genauer, unabhängig von dem während der Bewegung verfügbaren visuellen Feedback. Die linke Hand zeigte zwar eine

höhere Variabilität in der Durchführung der Bewegung, es fand sich jedoch kein Hinweis auf eine unterschiedlich gute Kontrolle der Kraft.

Weiterhin konnte Peters (1980) zeigen, daß sich die Leistung der Hände bei seriellen Bewegungen im wesentlichen in der benötigten Zeit zwischen den einzelnen Bewegungen unterscheidet und nur geringfügig in der eigentlichen Bewegungszeit (auch Todor und Doane 1978). Er schloß daraus, daß die dominante Hemisphäre schnelle serielle Bewegungen mit einer vergleichsweise höheren Effizienz programmieren kann. Auch die oben beschriebenen Ergebnisse von Annett (1979) kann man so deuten. Eine transcallosale Übertragungszeit für Informationen von nur 3-15 ms (Ledlow 1976, zitiert nach Carson 1990) läßt aber auch Zweifel an dieser Erklärung aufkommen, da die Programmierung durch die kontralateralen Hemisphäre theoretisch ohne wesentlichen Zeitverlust möglich wäre. Es erscheint daher nicht plausibel, daß die Bewegungen der beiden Hände auf einer qualitativ völlig verschiedenen Basis programmiert und durchgeführt werden. Die bestehenden Asymmetrien sollten somit besser als Kontinuum verstanden werden.

Wie Carson (1989) vertraten auch Balfour et al. (1991) die Meinung, daß Hemisphärenunterschiede eher auf der Ebene der Bewegungsvorbereitung bestehen und die Frage der Lateralisierung eigentlich als das Ausmaß der Lateralisierung diskutiert werden sollte (Bradshaw und Nettleton 1981).

Dieser Ansatz wirft die Frage auf, in welcher Form die Hemisphären zusammenarbeiten.

1.2.4 Das transaktionale Modell

Carson (1989) schlägt ein transaktionales Erklärungsmodell vor. Dabei hätte die linke Hemisphäre eher einen Vorteil bei der Verarbeitung sensorischer Informationen während einer Bewegung. Die rechte Hemisphäre wäre auf der Ebene der Bewegungsprogrammierung im Vorteil bei der Verarbeitung des räumlichen Feedbacks (Carson et al. 1990).

Eine Aufgabe, die sowohl eine hohe räumliche Anforderung aufweist als auch andere Komponenten, wie hohe Endpunktgenauigkeit, könnte also unter Mitwirkung der nichtdominanten Hemisphäre trotzdem sinnvoll und erfolgreich von der dominanten Hand ausgeführt werden.

Als anatomisches Korrelat für die Zusammenarbeit der Hemisphären hat Allen (1983) auf der Suche nach einem allgemeinen Konzept funktionelle Untereinheiten des Gehirns vorgeschlagen, die er Subprozessoren nennt. Diese unterscheiden sich seiner Meinung nach in ihrer Funktion und sind, je nach Funktion, ein- oder beidseitig angelegt. Er geht davon aus, daß diese Funktionseinheiten Informationen bearbeiten, untereinander austauschen und weiterleiten. Dabei könnte, auch wenn ein bilateraler Subprozessor angesprochen wird, primär nur ein Subprozessor einer Hemisphäre aktiv werden, da sich die Prozessoren in ihrer relativen Fähigkeit, die jeweilige Aufgabe zu bearbeiten, bezüglich ihrer rechts- oder linkshemisphärischen Lage unterscheiden. Moscovitch (1979) schlägt dazu vor, daß erst ab einem gewissen Niveau der Informationsverarbeitung (Assoziationsareale zweiter Ordnung) die Informationen in beiden Hemisphären entweder parallel und/oder seriell weitergegeben werden.

Allen (1983) ist der Ansicht, daß, entsprechend der Komplexität der Aufgabe, meist mehrere solcher Subprozessoren beteiligt sind und diese wahrscheinlich auch in andere Funktionen, wie der Sprache, involviert sind (Arbib und Caplan 1979).

Untersuchungen von Haaland und Harrington (1989) und Wyke (1968), die bei Patienten mit Schädigungen der linken Hemisphäre bilaterale motorische Defizite nachweisen konnten, sprechen ebenso für eine Informationsverarbeitung durch beide Hemisphären bei Aufgaben, die gemeinhin als unilateral gelten.

Insbesondere Guiard et al. (1983) vertraten die Meinung, daß die meisten Bewegungen, von denen man üblicherweise annimmt, daß einhändig durchgeführt würden, eigentlich beidhändig ausgeführt werden. Die Aussagen von Allen (1983) implizieren, die Frage der Lateralisierung eher auf komplexe Funktionseinheiten zu beziehen und nicht wie bisher auf spezielle Aufgaben, da bestehenden hemisphärischen Unterschiede bisher nicht im Rahmen der Frage nach der Verarbeitung des Feedbacks, des 'preprogramming', oder der Durchführung der Bewegung, beantwortet werden können.

1.3 Motorisches Lernen

1.3.1 Begriffsbestimmung

Der Begriff „motorisches Lernen“, bezeichnet ein Konstrukt, da Lernen nicht direkt beobachtet werden kann, und erfordert damit eine operationale Definition, um ihn der Untersuchung zugänglich zu machen. Eine Möglichkeit der Operationalisierung ist, sich am Verhalten zu orientieren und daraus auf den Lernerfolg zu schließen.

Motorisches Lernen wird allgemein als der Vorgang verstanden, durch den man die Fähigkeit zu motorischer Geschicklichkeit oder Fertigkeiten (skills) erwirbt. Das motorische Lernen und die Motorische Kontrolle wurden von mehreren Fachrichtungen zu ganz verschiedenen Zwecken erforscht. Es ergeben sich daher entsprechend unterschiedliche Erklärungsansätze, von denen nur einige wenige vorgestellt werden sollen.

Der englische Psychologe Pear gab 1927 eine der ersten Definitionen, indem er den Begriff der Fertigkeit als die Integration von hochabgestimmten Leistungen bezeichnete. Er forderte zusätzlich, daß diese Geschicklichkeit einen expliziten Bezug zur Quantität und Qualität des Ergebnisses haben müsse, sie erlernt sei und von Leistungsfähigkeit (capacity) und Talent (ability), als Voraussetzungen für Geschicklichkeit abzugrenzen sei. Welford (1868) beschrieb eine Fertigkeit als eine fachkundige, geschickte, schnelle und genaue Durchführung einer Bewegung, die nur nach längerem Training zu erwerben ist. Fowler und Turvey (1978) bezeichneten den Erwerb motorischer Fähigkeiten als eine Suche nach der Optimierung von Koordination und der Kontrolle verschiedener Variablen. Erlernt wird dabei die Koordination der perzeptiven Bedingungen einer Bewegung innerhalb einer gestellten Aufgabe.

Demgegenüber deutete Bernstein (1967) den Begriff der Koordination als den Vorgang, die vielen offenen räumlichen und zeitlichen Möglichkeiten einer Bewegung (i.e. degrees of freedom), einzuschränken, um einige wenige freie Parameter sinnvoll bemessen und kontrollieren zu können. Die Manipulation dieser wenigen Parameter kann man als eigentliche motorische Kontrolle ansehen, die laut Newell (1991) nach optimaler Zuweisung von Werten zu einer Fertigkeit (skill) führt.

Schmidt (1988) bezeichnet Lernen als den Vorgang, durch den man die Fähigkeit zu einer geschickten Handlung erwirbt, und als das Ergebnis von Übung oder

Erfahrung. Darüber hinaus hinterläßt dieser Vorgang seiner Ansicht nach eine relativ dauerhafte Veränderung hinsichtlich der Fähigkeit zur Durchführung eines geschickten Verhaltens und ist nicht direkt beobachtbar, so daß man darauf schließen muß. Er betont auch, daß die erworbene Fertigkeit eine grundlegende Funktion hat, wohingegen die Durchführung der Bewegung durch viele weitere Faktoren, wie z.B. Motivation, Müdigkeit oder mechanische Beeinträchtigung beeinflusst wird.

Sanes et al. (1990) unterscheiden motorisches Lernen von reiner Adaptation. Unter Adaptation verstehen die Autoren den reinen Austausch des Verhaltens als Antwort auf eine Änderung der sensorischen Rückmeldung oder einer veränderten Aufgabe. Es wird also nur die Durchführung i.e. die Strategie geändert, jedoch nicht langfristig das Verhalten verändert.

Zweifellos ist einer der wesentlichsten Faktoren, die das Erlernen einer Aufgabe fördern, die wiederholte Übung. Die erzielten Verbesserungen stellen sich in einer Lernkurve zunächst als große Schritte dar und werden mit fortgesetzter Übung kleiner. Wie die Übung einer Bewegung ist, im Zusammenhang mit motorischem Lernen, sicher das 'law of effect' von großer Wichtigkeit, das Thorndike (1927) aus seinen Versuchen durch Belohnung oder Bestrafung bestimmten Verhaltens bei Tieren formuliert hat. Übertragen auf Menschen wurden diese "Verstärker" als 'knowledge of result' bezeichnet, also die Möglichkeit die erzielten Ergebnisse mit der geplanten und der durchgeführten Bewegung zu vergleichen.

Adams (1971) betonte die Bedeutung von sensorischem Feedback und des 'knowledge of Result', wobei ein reduziertes Feedback zur Entwicklung motorischer Programmen günstig ist (Lai et al. 2000).

Als Phasen des motorischen Lernens schlug Fitts (1964) das kognitive, assoziative und autonome Stadium vor.

Anfangs versucht der Lernende, die Aufgabe zu begreifen, und entwickelt eine erste Strategie (kognitive Phase); die ersten Ergebnisse sind in der Regel sehr wechselhaft, vielleicht durch den laufenden Wechsel der Strategie. Der Lernzuwachs ist in dieser Phase enorm und spricht gut auf äußere und eigene Strategievorschläge an. Adams (1971) nannte diesen Abschnitt deswegen auch die verbal-motorische Phase. Die Möglichkeit, die tatsächlich durchgeführte Bewegung mit einem vorgegebenen Ziel zu vergleichen, ist sicher eine der wichtigsten Faktoren in dieser Phase und führte Adams (1971) zur Formulierung

der closed-loop Theorie beim motorischen Lernen. Da viele Bewegungen aber sicher zumindest zum Teil open-loop kontrolliert werden, wenn sie erlernt sind, muß eine qualitative Veränderung der Bewegung im Verlauf des Lernprozesses stattfinden, das heißt, daß sich die Art der motorischen Kontrolle und die Verwendung von Feedback langsam vom closed-loop Modus entfernt. Die assoziative Phase (Fitts 1964) beginnt, nachdem die effektivste Strategie ausgewählt wurde. Die Verbesserungen in der Durchführung der Bewegung sind subtiler, die Bewegungen konstanter. Verbal-kognitive Aspekte sind weitgehend verschwunden, und der Lernende konzentriert sich mehr auf die Durchführung. Nach einer längeren Übungszeit entsteht die autonome Phase, die Bewegung läuft nun weitgehend eigenständig ab. Die Aufgabe kann jetzt auch neben anderen Tätigkeiten durchgeführt werden, das heißt sie benötigt nicht mehr die gesamte Aufmerksamkeit. In diesem Stadium sind die Bewegungen schon sehr konstant, stabil und gleichmäßig. Man kann davon ausgehen, daß motorische Programme etabliert wurden.

Im folgenden werden motorische Programme näher charakterisiert.

1.3.2 Die Schematheorie

Schmidt (1975) geht in seiner Schematheorie von generalisierten motorischen Programmen aus, die für die Durchführung mit geeigneten Parametern ausgestattet werden. Er fordert dafür zwei Gedächtnisfunktionen, eine tatsächliche Erinnerung an eine Bewegung und eine weitere, die durch das Wiedererkennen die aktuelle Bewegung bewertet. Während des Erlernens werden seiner Ansicht nach vier Informationen gespeichert. Die erste davon beinhaltet die initialen Bedingungen (z.B. Startposition, Gewicht), die vor der Bewegung bestehen. Als nächstes werden die verwendeten Parameter für das motorische Programm festgelegt. Als drittes wird das Ergebnis in der Umgebung im Sinne des 'knowledge of result' gespeichert, und zuletzt die sensorischen Konsequenzen (wie sich die Bewegung anfühlt, anhört, aussieht u.s.w.) festgehalten. Diese vier Punkte werden von den beiden oben erwähnten Gedächtnisstrukturen zum Aufbau eines Schemas verwendet. Mit Hilfe des Erinnerungsschemas werden durch wiederholte Versuche und deren äußeres Ergebnis geeignete Parameter für das motorische Programm erarbeitet. Das Wiedererkennungsschema dagegen wird hauptsächlich durch die Wahrnehmung des sensorischen Feedbacks aufgebaut.

Wulf et al. (1993) haben aufbauend auf die Schema Theorie (Schmidt 1985) die invarianten Anteile einer Bewegung, also das relative Timing, als Maß für ein generalisiertes Motorprogramm bewertet. Demgegenüber reflektierten ihrer Meinung nach die varianten Anteile einer Bewegung, nämlich das absolute Timing, die Qualität der Parameterspezifizierung. Diese varianten und invarianten Bewegungsanteile wurden von verschiedenen Übungskonditionen unterschiedlich beeinflusst (Wulf et al. 1993). Lai et al. (2000) konnten zeigen, daß die konstante nicht variable Übung einer Aufgabenstellung die invarianten Anteile einer Bewegung fördert, insbesondere am Anfang der Übung, bis die motorischen Programmen etabliert sind. Die Variation der Übung im weiteren Übungsverlauf verbessert die genaue Zuordnung der Parameter in Transferaufgaben.

Wie oben bereits beschrieben sind closed-loop Bewegungen fehlerkonzentriert, das heißt, daß das verfügbare Feedback mit der Bewegungsvorlage wiederholt verglichen wird, um die entdeckten Abweichungen (Fehler) in der stattfindenden Bewegung zu korrigieren. Dagegen sind open-loop Bewegungen im wesentlichen vorprogrammiert, und die Bewegungszeit ist so kurz, daß während der Durchführung wahrscheinlich wenig oder kein Feedback verarbeitet werden kann. Eine durchaus naheliegende Erklärung wäre, daß eine Bewegung zu Beginn des Lernprozesses, entsprechend Adams Lerntheorie (1971), stark feedbackbezogen, also closed-loop, abläuft, sich dann aber im weiteren Verlauf des Lernens zu einer mehr open-loop gesteuerten Bewegung entwickelt.

Weiter oben wurde bereits eine Unterteilung von Bewegungen in zwei Klassen beschrieben (Typ I und Typ II).

Es bietet sich geradezu an, den Übergang von einer langsamen foveal kontrollierten Bewegung des Typ I zu einer schnellen im Ganzfeld überwachten Bewegung des Typ II als ein wesentliches Moment des motorischen Lernens zu betrachten.

1.4 Kontralateraler Transfer

Der Begriff des kontralateralen (oder bilateralen) Transfers bedeutet, daß bei der motorischen oder mentalen Übung der einen Körperhälfte die andere Seite mitgeübt wird. Laut Egger (1975) kann man den bilateralen Transfer als eine Sonderform des allgemeinen Transfers beim motorischen Lernen verstehen, also der Beeinflussung eines Lernprozesses durch vorangegangene Lernaktivitäten.

Im Speziellen handelt es sich aber um eine intrapersonelle Leistungssteigerung nichtgeübter Bewegungen einer Extremität bei gleichbleibender Aufgabenstellung. Obwohl das Phänomen des kontralateralen Transfers schon relativ lange bekannt ist (Fechner 1858) und ausreichend empirische Erkenntnisse vorliegen gibt es nur wenige Untersuchungen über den theoretischen Hintergrund und die praktische Anwendung oder die mögliche Bedeutung für die motorische Rehabilitation. Das für den Transfer notwendige Corpus callosum ist bei der Geburt nahezu nicht myelinisiert und zeigt bis zum Alter von 3 Jahren ein schnelles Wachstum, das sich langsamer bis ins Jugendalter fortsetzt (Witelson und Kigar 1988). Neben der frühen Hemisphärenspezialisierung ist auch kontralateraler Transfer beim Gesichtererkennen schon an Kindern im Alter von 3 bis 6 Monaten nachzuweisen (de Schonen und Bry 1987).

Um den Zeitpunkt des kontralateralen Transfers zu bestimmen ließen Hicks et al. (1982) die Probanden während einer einhändigen motorischen Lernaufgabe mit der zweiten Hand ein Tischbein festhalten. In diesem bestechend einfachen Experiment konnten sie zeigen, daß der kontralaterale Transfer, also die Übermittlung der jeweiligen Information zur gegenüberliegenden Hemisphäre, offenbar schon während des Lernvorgangs stattfindet und zu diesem Zeitpunkt auch verhindert werden kann.

Es besteht kein Zweifel, daß die beidseitige Übung von typisch einseitig praktizierten Aufgaben, bei gleicher Übungszeit, der einseitigen Übung überlegen ist (Drenkow 1960, Nagy 1972, Fischer 1979, Nagel 1983). Es ist jedoch nicht klar, mit welcher Hand es günstiger ist zu beginnen. Kuhn (1986) zeigte in einer Übersicht über eine Reihe von Arbeiten zum kontralateralen Transfer bei koordinativen Aufgaben, daß die Aussagen über die Transferstärke in Abhängigkeit von der Transferrichtung durchaus widersprüchlich sind. In einer Studie von Imamizu und Shimojo (1995) bestand in einer visuomotorischen Aufgabe keine bevorzugte Transferrichtung. Halsband (1992) konnte für Schreibbewegungen ein

Überwiegen des Transfers von der rechten Hand zur linken, i.e. eine bessere Generalisierung der Bewegungsprogramme von der linken zur rechten Hemisphäre darlegen.

Dagegen konnte Poretz (1983) bei Tanzbewegungen einen besseren Transfer von der rechten Hemisphäre zur linken Hemisphäre zeigen.

Die Diskrepanz der Ergebnisse könnte zum Teil von den verschiedenen Aufgabenstellungen und der möglicherweise unterschiedlichen Verarbeitung solcher Aufgaben durch die beiden Hemisphären herrühren. Anzunehmen ist hierbei, daß die rechte Hemisphäre räumliche Bewegungen, wie Tanzen, bzw. die linke Hemisphäre schnelle sequentielle Bewegungen, wie Schreiben, jeweils leichter erlernt und besser auf die andere Hemisphäre übertragen kann. Auch zusätzliche Veränderungen einer trainierten Aufgabe scheinen eine Rolle zu spielen. In einer Studie von Stoddard und Vaid (1996) bestand nach vertikaler Kippung der Versuchsanordnung ein besserer Transfer von der dominanten zur nichtdominanten Hand, die horizontale Kippung dagegen zeigte mehr Transfer von der nichtdominanten zur dominanten Hand. Zusätzlich gibt es Anhalt für die 'dynamic dominance hypothesis', die besagt, daß die dominante Hemisphäre auf die trajektorielle Bewegungskontrolle spezialisiert ist und diese auch besser von der dominanten Hand zur nichtdominanten Hand übertragen werden kann. Demgegenüber wird die erlernte Information des Bewegungsendpunktes effektiver von der nichtdominanten Hemisphäre verarbeitet und besser auf die dominante Hand übertragen (Sainsburg und Wang 2002).

1.5 Quantitative Erfassung von motorischen Lernleistungen

1.5.1 Methoden zur Untersuchung motorischen Lernens

Motorische Störungen gehören zu den häufigsten Beeinträchtigungen hirngeschädigter Patienten. Daher ist die qualitative Untersuchung von motorischen Leistungen, sowie ein Verfahren zur Beurteilung der Lern- und Leistungsfähigkeit von großem Nutzen für die geplante Therapie und deren Verlauf und Prognose.

Gerade die Indikationsstellung und der Erfolg der rehabilitativen Maßnahmen hängen wesentlich davon ab, wie zuverlässig das Störungsbild diagnostisch erfaßt und auf welche Weise es unter dem Aspekt der Rehabilitation beschrieben werden kann (Zihl 1988, Mai und Marquardt 1995).

Zusätzlich sollte das Untersuchungsverfahren die Auswahl verschiedener Schwierigkeitsgrade beinhalten, damit der Patient nicht längerfristig über- oder unterfordert wird. Es sollte bei möglichst geringem zeitlichem und finanziellem Aufwand ein Maximum diagnostischer Erkenntnis bieten und muß darüber hinaus patientengerecht sein und sollte, soweit möglich, gleichzeitig als Training anwendbar sein.

Zwei Aspekte des motorischen Lernens erschweren eine Untersuchung bezüglich des experimentellen Designs außerordentlich.

Wie bereits oben erwähnt wurde, kann Lernen nicht direkt beobachtet werden, da es sich um eine Änderung einer Fähigkeit handelt. Man muß Lernen daher aus Änderungen des motorischen Verhaltens oder der Hirnaktivität indirekt ableiten. Das Verhalten ist, wie Schmidt (1988) betont, dem Erlernten durchaus nicht gleichzusetzen. Zweitens entzieht sich der Vorgang des motorischen Lernens durch die Komplexität der reinen Beobachtung des Verhaltens. Man verzichtet ohne eine quantitative Erfassung also nicht nur auf Objektivität und Verlässlichkeit; auch die Gültigkeit der Ergebnisse ist nur schwer einzuschätzen.

Aus den genannten Gründen ist es notwendig Kriterien aufzustellen, aus denen man einen Lernerfolg relativ sicher folgern kann und die möglichst quantitativ erfaßbar sind. Dafür eignen sich z.B. die Untersuchungen von längerfristigem Behalten (Retention) oder Transfereffekten zur anderen Hemisphäre oder auf eine andere Aufgabe.

Man kann zwischen ergebnisbezogenen und kinematischen Parametern unterscheiden. Ergebnisbezogene Meßparameter sind Dauer, Amplitude, oder Fehler einer Bewegung. Kinematische Parameter dagegen sind Geschwindigkeit, Beschleunigung, Abweichung, Wechsel im Geschwindigkeitsverlauf, Winkel eines Gelenks oder Daten aus der Elektromyographie.

Die Messung der Genauigkeit einer Bewegung läßt sichere Aussagen über die Bewegungskontrolle zu. Hat der Patient dagegen aber z.B. das Problem, daß er nicht schreiben kann, um sich eine Notiz zu machen oder zu unterschreiben, spielt die Genauigkeit eine sehr untergeordnete Rolle. Vielmehr ist häufig die automatisierte Durchführung einer Bewegung gestört. Daher sollte ein Untersuchungsverfahren neben anderen Parametern insbesondere die Automatisierung einer Bewegung erfassen.

Es hat sich herausgestellt, daß erst kinematische Parameter eine ausreichend sichere Aussage über die Automatisierung einer Bewegung zulassen (Mai und Marquardt 1995). Die genannten Autoren bezeichnen eine Bewegung als automatisiert, wenn ein eingipfeliges Geschwindigkeitsprofil, ein glatter Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf und eine hohe Wiederholgenauigkeit einer Bewegung (im Phasendiagramm) vorliegen.

Mit den üblichen Untersuchungsverfahren werden oft die erhaltenen Leistungen, aber zum Teil auch die eigentliche motorische Störung übersehen.

Einsicht über die Beteiligung verschiedener Zentren des zentralen Nervensystems kann man durch das Ableiten von Hirnströmen (EEG), der transcraniellen Magnetstimulation oder durch eine Durchblutungsmessung im Rahmen von single photon emission computed tomography (SPECT), positron emission tomography (PET) erlangen (Raichle 2003). Den beiden letztgenannten Methoden liegt die quantitative Erfassung des regionalen cerebralen Blutflusses (CBF) zugrunde. Insbesondere läßt sich mit der BOLD Technik (blood oxygenation level dependent) der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRI) in den drainierenden Venolen die Blutoxygenierung quantifizieren und hervorragende anatomische Korrelationen erstellen.

Der Nachteil dieser prozessorientierten Methoden liegt neben dem hohen Aufwand darin, daß nicht sicher festzustellen ist ob alle beteiligten Zentren für die Aufgabe notwendig sind und ob tatsächliches Lernen stattfindet. Wichtig ist deshalb, daß die Untersuchungsparadigmen und deren Auswertung sehr genau überdacht sein müssen. Eventuell sind neben den notwendigen Aktivierungs- und Ruhephasen zusätzliche Vergleichsuntersuchungen mit geänderten Bedingungen oder eine Transferaufgabe notwendig, um auszuschließen, daß eine Aktivierung des Gehirns durch andere parallel ablaufende Prozesse verursacht wird, z.B. durch ein Startsignal und um festzustellen, ob tatsächlich motorisches Lernen stattgefunden hat. Zusätzlich kann man auf direkte Meßdaten z.B. durch Tiefenelektroden (bei Epilepsiepatienten) zurückgreifen oder auf Daten aus Tierversuchen an Primaten extrapolieren.

Durch zeitlich auflösende Untersuchungsmethoden der fMRI können mittlerweile auch neuroanatomische Verbindungen des motorischen Lernens in einem funktionellen Zusammenhang dargestellt werden (Toni et al. 2002)

1.5.2 Das Gesetz von Fitts'

Fitts hat 1954 eine Beziehung zwischen der Bewegungszeit, der Zielpunktgenauigkeit und der Amplitude einer Bewegung beschrieben, die als Fitts' Paradigma bekannt ist und sehr lange unangefochten blieb (Keele und Posner 1968). Dieses Gesetz blieb trotz intensiver Forschung, insbesondere im Bereich der Biokybernetik eines der wenigen, das die Zusammenhänge der motorischen Kontrolle während der Durchführung einer Bewegung annäherungsweise zu beschreiben vermag.

Fitts' Versuchsanordnung beinhaltet zwei gleich große rechteckige Zielareale mit einer bestimmten Fläche (W = Width), deren Mittelpunkte die Amplitude (A) voneinander entfernt sind. Aufgabe der Probanden ist es, mit einem Stift für kurze Zeit so schnell wie möglich zwischen den beiden Arealen hin- und herzutippen.

Fitts zeigte, daß die durchschnittliche Bewegungszeit (MT) folgendermaßen mit der Amplitude (A) und der Fläche (W) in Relation steht:

$$MT = a + b \log_2 (2A / W)$$

wobei a und b Konstanten sind und $\log_2 (2A / W)$ den Schwierigkeitsgrad darstellt. Diese Gleichung hat sich trotz großer Variationen in allen drei Parametern als sehr stabil in ihrer Aussagekraft erwiesen.

Ein in der Diskussion der Ursachen dieses Zusammenhangs häufig vertretener Erklärungsansatz ist, daß die Kapazität der Informationsverarbeitung begrenzt sei ('limited channel capacity'). Offen bleibt hierbei die Frage, ob das auf einer begrenzten Transmissionskapazität oder einer limitierten Informationsverarbeitung beruht.

Carlton (1980) vertrat die Meinung, daß die Zeit, die zur Verarbeitung des visuellen Feedbacks benötigt wird, möglicherweise die wesentliche Determinante für den 'speed-accuracy trade-off', also des reziproken Verhältnisses zwischen Bewegungszeit und Genauigkeit darstellt, da die Bewegungszeit im wesentlichen durch die Anzahl der Korrekturbewegungen während der 'homing-in' Phase bestimmt wird.

Einen Kritikpunkt an Fitts' Paradigma stellt die Tatsache dar, daß die Amplitude (A) und die Zielfläche (W) in dieser Gleichung als unabhängige Variablen gelten.

Dies trifft jedoch für die Fläche (W) nicht zu, da man feststellte, daß die Probanden in dieser Situation den erwähnten 'speed-accuracy trade-off' anwenden, also bei abnehmender Bewegungszeit die Genauigkeit (Mittelpunkt der Zielfläche) nicht mehr einhalten können. Somit ist die Fläche (W) keine streng unabhängige Variable mehr.

Daher schlugen Schmidt et al. (1978) vor, die Amplitude und die Bewegungszeit (MT) als unabhängige Variablen vorzugeben, da diese vermutlich beim Programmieren der Bewegung von den Probanden schon festgelegt werden und sich die Genauigkeit eher als Ergebnis darstellt.

Ein weit wichtigerer Kritikpunkt ist aber sicher der, daß Fitts aus einer Reihe aufeinanderfolgender Bewegungen in einer bestimmten Zeitspanne die Bewegungszeit geschätzt hat.

Dadurch gehen ganz wesentliche Informationen über die Qualität und die genaue Dauer einer Bewegung verloren. Man vergibt dabei die Beobachtungsmöglichkeit der sicher vorhandenen Korrekturbewegungen und der Zeit, die zum Programmieren zwischen den einzelnen Bewegungen nötig ist.

Im Gegensatz zum 'speed-accuracy trade-off' entwickelt sich beim motorischen Lernen eine Verkürzung der Bewegungszeiten bei gleichbleibender oder erhöhter Genauigkeit. Insofern kann Fitts' Gesetz immer nur einen momentanen Zustand beschreiben, der aber zwangsläufig sehr kurz ist, da man Lernen unter Wiederholung einer Aufgabe kaum verhindern kann. Das heißt letztendlich, daß Fitts' Gesetz strenggenommen nur auf einen Ausschnitt des motorischen Lernens anwendbar ist, weil die Möglichkeit der Veränderung des Verhaltens, also ein Lernprozeß, innerhalb Fitts' Gesetz nur durch Veränderung der Konstanten beschrieben werden kann. Ein weiteres wichtiges Prinzip der Bewegungskontrolle ist die Invarianz der Bewegungszeiten.

1.5.3 Konstante Figurzeit

Die Invarianz der Bewegungszeiten von bestimmten Bewegungen, also die relative Unabhängigkeit der Durchführungszeit von der Bewegungsamplitude, wurde bereits früh von Derwort (1938) und Searle und Taylor (1948) bzw. Taylor und Birmingham (1948) beschrieben. Katz (1948) untersuchte Schriften mit einer um den Faktor fünf unterschiedlichen Größe und stellte dabei fest, daß sich trotz der unterschiedlichen Größe der Buchstaben die Durchführungszeit beim Schreiben kaum veränderte.

Terzuolo und Viviani (1979), Viviani und Terzuolo (1982) sowie Soechting und Flanders (1997) konnten die Segmentierung einer scheinbar kontinuierlichen Bewegung in einzelne Abschnitte darstellen, die durch die tangentielle Geschwindigkeit festgelegt wurde. Da diese Segmente bei Wiederholung der Bewegung in der relativ selben Zeit durchfahren werden, wurde die Unabhängigkeit der Bewegungszeit von der Bewegungsamplitude relative zeitliche Invarianz oder Isochronie genannt (Rosenbaum 1991, Franks und Stanley 1991).

Es zeigte sich in späteren Studien, daß dieses Prinzip sehr universell anwendbar ist und auf eine Vielzahl von Bewegungen zutrifft (Shapiro 1977, Summers 1977, Terzuolo und Viviani 1979, Enoka 1983, Carter und Shapiro 1984).

Das zugrundeliegende Kontrollprinzip wurde auch als 'pulse height control' (Gordon und Ghez 1987) und als 'speed control system' bezeichnet (Enoka 1983), da die Anpassung der Intensität der Muskelkontraktion bei der Durchführung von Bewegungen unterschiedlicher Amplituden dafür sorgt, daß die Dauer der Kontraktion konstant gehalten werden kann.

Freund und Büdingen (1978), Wallace und Wright (1982) wie auch Gielen et al. (1985) konnten zeigen, daß der Anstieg der Muskelspannung ('rate of rise of tension') vom motorischen System so an die Bewegungsamplitude angepaßt wird, daß der zeitliche Verlauf ('force rise time') relativ gesehen gleich bleibt. Anders ausgedrückt steigt die Geschwindigkeit der Kontraktion linear mit zunehmender Amplitude der Bewegung an.

Viviani und Terzuolo (1982) demonstrierten an Hand von Schreibbewegungen, daß diese Beziehung sowohl auf Teilstrecken als auch auf die ganze Bewegung zutrifft, und erhoben die Isochronie zu einem allgemein gültigen Prinzip der motorischen Kontrolle.

Nachgewiesen wurde diese Isochronie der Bewegungsabschnitte für schnelle isometrische, isotonische, und auch für komplexe, insbesondere aber für überlernte Bewegungen. Gentner (1987) dagegen konnte mit einem Test für die konstanten Proportionen einer Bewegung zeigen, daß diese relative zeitliche Invarianz nur annähernd eingehalten wird. Das widerspricht nicht grundsätzlich dem Prinzip, daß Bewegungen vom ZNS um ein zeitliches Gerüst programmiert werden (Franks und Stanley 1991). Vielmehr gibt es offenbar zusätzliche Faktoren für die unvollständige periphere Realisierung der Invarianz, wie z.B. die Massenträgheit des ausführenden Organ. Am genauesten ließ sich die Invarianz an Hand der Dauer der Kraftentwicklung einer Bewegung ('force rise time') nachweisen, also zu Beginn einer Bewegung, da hier die Trägheit keine entscheidende Rolle zu spielen scheint (Freund 1986, Gordon und Ghez 1987).

Ein weiterer Grund dürfte die Verwertung peripheren Feedbacks während der Durchführung einer Bewegung sein, die den zeitlichen Ablaufs deutlich beeinflusst und eine nicht vollständig flüssige (automatisierte) Ausführung der Bewegung bewirkt.

Darüber hinaus tritt die zeitliche Invarianz bei hoch überlernten Bewegungen auf und wird somit möglicherweise oft nur asymptotisch erreicht, da nicht auszuschließen ist, daß bei weiterer Übung die zeitliche Struktur noch verbessert wird.

Der Sinn des Prinzips der zeitlichen Invarianz ist vermutlich, die Kontrolle einer Bewegung zu vereinfachen, indem die Anzahl der Variablen (Degrees of freedom), die kontrolliert werden müssen (Bernstein 1967, Enoka 1983), eingeschränkt wird. Gordon und Ghez (1987) konnten zeigen, daß mit einer besseren Regulation des Kraftanstiegs auch die Genauigkeit der Bewegung zunimmt.

Durch die zeitliche Invarianz der Dauer des Kraftanstiegs kann die Kontraktion der verschiedenen beteiligten Muskeln zur relativ selben Zeit erfolgen, unabhängig von der angewandten Kraft oder der absoluten Durchführungszeit (Büdingen und Freund 1976, Freund 1986). Da an den meisten Bewegungen auch antagonistische Muskeln mitwirken, wird durch dieses Prinzip die Synergie der beteiligten Muskeln gewährleistet, die zur erfolgreichen Durchführung einer Bewegung notwendig ist.

Darüber hinaus dürfte aus den genannten Gründen die zeitliche Invarianz eine der wesentlichen Eigenschaften einer Bewegung sein, die beim Erlernen der Bewegung aufgebaut werden (Franks und Stanley 1991).

Dieser Mechanismus kann bei Patienten mit Hirnläsionen unterschiedlicher Genese gestört sein. Typischerweise entsteht keine Isochronie bei Patienten mit extrapyramidalen Bewegungsstörungen oder mit Läsionen des linken lateralen prämotorischen Cortex oder des linken paramedianen Thalamus (Halsband 1992).

1.6 Fragestellung

1. Inwieweit eignen sich die Parameter Bewegungszeit, Anzahl der Geschwindigkeitswechsel und der Quotient aus den Bewegungszeiten zur Operationalisierung des motorischen Lernens ?
2. Für welche der genannten Parameter läßt sich ein kontralateraler Transfer nachweisen ?
3. Gibt es eine bevorzugte Transferrichtung ?

2. Probanden und Methodik

2.1 Auswahl der Aufgaben

Für die vorliegende Untersuchung wurden nach einigen Vorversuchen insgesamt drei verschiedene geometrische Figuren unterschiedlicher Schwierigkeit ausgewählt. Diese Figuren sollten beim jeweiligen Experiment mit einem Stift nachgezeichnet werden.

Die Auswahl dieser Vorlagen richtete sich nach folgenden Kriterien:

- die Ähnlichkeit mit Schreibbewegungen hinsichtlich Form und Größe sollte gering sein, um einen a priori Vorteil der linken Hemisphäre zu umgehen
- die Streckenlängen wurden zur anschaulichen Darstellung der Isochronie der Bewegungszeiten entsprechend ausgewählt
- sowohl die Figur als auch Bewegungsrichtung sollten ungewohnt sein im Vergleich zu bereits erlernten Bewegungen, um motorisches Lernen zu ermöglichen
- aufgrund der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit der Patienten und gesunden Probanden sollten verschiedene Stufen der Schwierigkeit erzielt werden

Experiment 1 :

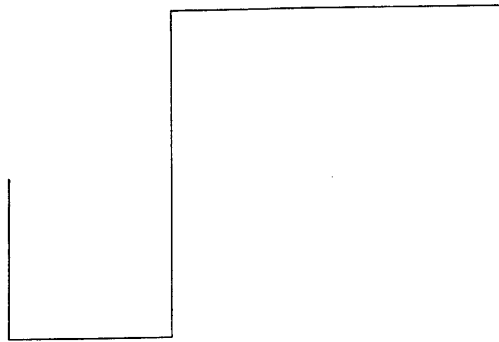
Für das erste Experiment wurde Figur 1 mit vier Teilstrecken verwendet (Abb. 2.1 a). Ausgewertet wurden die Strecken 1 und 3 (Senkrechte). Um die Darstellung einer entstehenden Isochronie zu vereinfachen waren sie 14 cm und 7 cm lang.

Beim Nachweis einer konstanten Figurzeit (Isochronie der Durchführungszeiten) liefe der Quotient (lange Strecke / kurze Strecke) gegen eins, im anderen Falle gegen zwei. Die Handhabung des Stiftes entsprach weitgehend natürlichen Bedingungen.

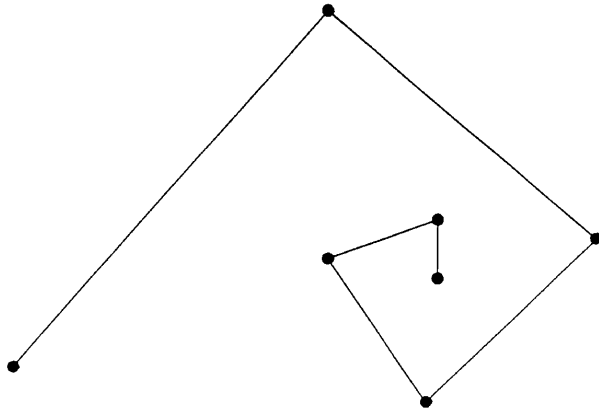
In Experiment 2 wurden nacheinander die Figuren 2 und 3 verwendet (Abb. 2.1 b und 2.1 c). Diese enthielten zusätzlich zu den ausgewerteten Teilstücken weitere Strecken, um vergleichbare Start- und Endbedingungen für die bewerteten Strecken zu schaffen, und die Schwierigkeit weiter anzuheben.

Figur 2 (Abb. 2.1 b) bestand aus sechs Teilstrecken; die vier ausgewerteten Strecken waren 15 , 10 , 7.5 und 5 cm lang.

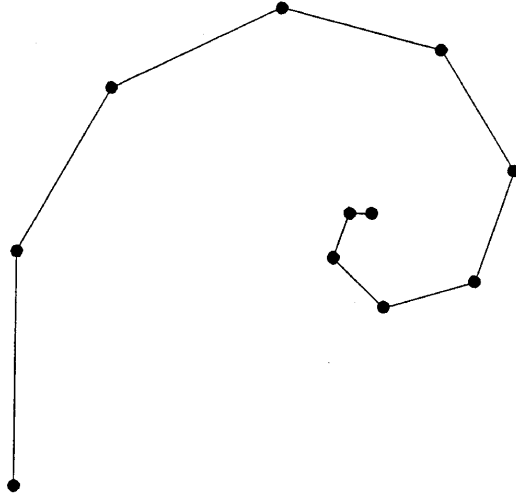
Figur 3 (Abb. 2.1 c) war aus zehn Strecken zusammengestellt deren Länge in 1-cm- Schritten von 10 cm bis 1 cm abnahm. Die Längen der vier ausgewerteten Strecken betrugen 8 , 6 , 4 und 3 cm.



a)



b)



c)

Abbildung 2.1: a – c zeigt die für die Untersuchung verwendeten Figuren 1, 2 und 3.

2.2 Auswahl der Versuchspersonen

In zwei Experimenten wurden insgesamt 40 männliche Normalpersonen im Alter zwischen 20 und 63 Jahren untersucht, die sich auf einen Aushang hin für die Versuche anmeldeten und dem Edinburgh Inventar (Oldfield 1971) zufolge Rechtshänder waren.

Für beide Experimente wurden je zwei Gruppen von zehn Personen gebildet, die erste begann mit der rechten Hand, die zweite mit der linken Hand. Das durchschnittliche Alter lag für Experiment 1 in Gruppe 1 bei 30.3 Jahren ($s = 7.4$) und für Gruppe 2 bei 29.7 Jahren ($s = 9.6$). Beim zweiten Experiment lag in Gruppe 1 das Durchschnittsalter bei 29.1 Jahren ($s = 9.8$) und in Gruppe 2 bei 27.6 Jahren ($s = 12.6$). Für die Teilnahme an der Studie erhielten die Probanden 15.- DM.

Bei der Auswahl der gesunden Probanden wurde darauf geachtet, daß diese keine motorische Beeinträchtigung der oberen Extremität und keine Visuseinschränkungen hatten. Darüber hinaus konnten die Probanden nur einmal an der Studie teilnehmen, um Transfer aus vorhergehenden Aufgaben zu vermeiden.

Ausgeschlossen wurden Probanden, die in den zwanzig Durchgängen der ersten Hand keinerlei Verbesserung hinsichtlich der hier verwendeten Parameter zeigten, da demzufolge dann auch kein Transfer des Lernerfolgs bei der Untersuchung der zweiten Hand nachweisbar gewesen wäre. Daher mußten die Meßergebnisse von 3 Personen bei Experiment 1 und 4 Personen bei Experiment 2 durch neue Untersuchungen an weiteren Probanden ersetzt werden, um für jedes Experiment verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

Weiterhin wurden Patienten mit Hirnschädigungen unterschiedlicher Ätiologie untersucht, deren Ergebnisse als Beispiele dargestellt werden. Im Kapitel "Ergebnisse" werden die Untersuchungsbefunde von 3 gesunden Probanden und 4 Patienten als Beispiele dargestellt.

Alle Personen nahmen freiwillig teil und wurden auf Wunsch nach der Untersuchung über die Ziele der Studie aufgeklärt.

2.3 Durchführung

Alle untersuchten Personen wurden über Dauer und Ablauf der Untersuchung aufgeklärt. Zuerst wurde bei den Teilnehmenden mit Hilfe des Edinburgh Inventars (Oldfield 1971) die Händigkeit festgestellt.

Für die Untersuchung saß der Proband an einem Graphiktablett. Der Proband wurde gebeten, eine bequeme Sitzposition einzunehmen und die Höhe seines Stuhles einzustellen, um eine möglichst natürliche Schreibposition zu erreichen.

Da die Stiftspitze federnd gelagert war, sollten die Teilnehmer zuerst mit jeder Hand das Nachfahren auf einer Kreislinie ausprobieren.

Die jeweilige Figur wurde erst bei Beginn der Untersuchung gezeigt, so daß die Probanden vor den Versuchen weder die Möglichkeit zur tatsächlichen, noch zur mentalen Übung hatten.

Den Probanden wurde bei Experiment 2 nicht mitgeteilt, daß es sich um zwei aufeinanderfolgende Aufgaben (Figuren) handelte.

Die Instruktion für die Durchführung lautete, die Figur so genau und so schnell wie möglich nachzufahren. Die Probanden wurden gebeten, sich auf die Durchführung der Bewegung zu konzentrieren und währenddessen nicht zu sprechen.

Es wurden jeweils 20 Versuche mit jeder Hand ausgeführt, wobei die Aufzeichnung mit dem Aufsetzen des Stiftes begann. Dabei benutzten die Probanden, je nach Gruppenzuteilung, zuerst die rechte oder linke Hand. Die untersuchten Patienten begannen immer mit ihrer besseren (gesunden) Hand, unabhängig von ihrer bisherigen Händigkeit. Grundsätzlich war der Ablauf für alle Probanden gleich. Die Untersuchung dauerte für Figur 1 etwa 20 Minuten, bei Patienten bis zu 40 Minuten. Für die Figuren 2 und 3 benötigten die Probanden insgesamt etwa eine Stunde. Zwischen den Durchgängen entstanden Pausen von etwa einer halben Minute; beim Handwechsel und beim Übergang zu Figur 3 wurden ca. 3 Minuten Pause eingelegt.

Extrinsisches Feedback über Durchführungszeiten, Genauigkeit oder Nummer des Durchgangs wurde nicht gegeben.

2.4 Meßsystem

Für die Aufzeichnung der Bewegungsabläufe stand ein Graphiktablett (Digitizer KC 5500 von Gaphitec) zur Verfügung, das die Ortskoordinaten der Stiftspitze in der x/y- Ebene mit einer räumlichen Auflösung von 0.05 mm und einer zeitlichen Auflösung von 166 Hz registrierte. Das induktive Meßverfahren erlaubte auch dann eine Registrierung wenn der Stift bis zu 1.3 cm von der Unterlage abgehoben wurde.

Das Graphiktablett war an einen PC angeschlossen. Mit Hilfe eines von Mai et al. (1992) zur Analyse von Schreibbewegungen entwickelten Programms wurden aus den registrierten Ortskoordinaten die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe errechnet.

Diese Art der Berechnung ist für die weitere Analyse der Daten aus zwei Gründen äußerst kritisch (Marquardt und Mai 1994). Zum Ersten sind die registrierten Daten mit räumlichen, zeitlichen und systembedingten Fehlern behaftet, die zusätzlich durch die Ableitung aus den Ortskoordinaten (zur Geschwindigkeitsberechnung) mit der Abtastezeit (n) multipliziert werden.

Damit dies nicht zu gravierenden Fehlern führt, arbeitet das Programm "CS" mit einem speziellen mathematischen Verfahren, der nonparametrischen Kernschätzung, einer Art gleitender Mittelung der Daten mit einer vorgegebenen Schätzfunktion (Mai et al. 1992).

Der resultierende Restfehler beträgt für den Ort schätzungsweise nur noch ± 0.12 mm und für die Geschwindigkeit ± 4 mm/s.

2.5 Analyse

Zur Analyse wurde die aufgezeichnete Bewegung als x/y- Bewegungsspur mit dem dazugehörigen Geschwindigkeitsverlauf und dem zurückgelegten Weg für jeden Durchgang des entsprechenden Probanden dargestellt. Mit Hilfe zweier beweglicher Marker war es möglich, die Bewegung im Detail mitzuverfolgen während die Meßwerte und ihre deren Differenzwerte (wie z.B. die Bewegungsdauer) am Bildschirm angezeigt wurden. Nach Abschluß der Aufzeichnung aller Übungsdurchgänge eines Probanden wurden als Variablen ausgewertet:

- die Bewegungsdauer (in ms) pro Teilstrecke
- die Anzahl der Richtungswechsel im Geschwindigkeitsverlauf (Peaks) als Maß für die Automatisierung (Number of Inversions)

Auf die Messung der Genauigkeit wurde aus den oben genannten Gründen verzichtet. Diese Parameter wurden für jede Person für zwanzig Durchgänge mit jeder Hand mit je 2 (Figur 1) bzw. 4 oder (Figur 2 und 3) Teilstrecken pro Figur erfaßt. Die Teilstrecken wurden mit einem Maus-Cursor im Geschwindigkeitsverlauf markiert. Als Begrenzungen einer Teilstrecke, i.e. Anfang und Ende eines Bewegungsabschnitts, wurden die Minima im Geschwindigkeitsverlauf definiert. Diese konnten im Zweifel auch durch Schnittpunkte der x-Achse im Beschleunigungsverlauf mitverfolgt und bestätigt werden.

Korrespondierend dazu wurden vom Programm "CS" die Wechsel im Geschwindigkeitsverlauf für den betreffenden Bewegungsabschnitt ausgezählt. Zur Analyse der Rohdaten wurden, getrennt für jeden Durchgang, innerhalb einer Gruppe die Mittelwerte der Bewegungszeiten und der Anzahl der Richtungswechsel im Geschwindigkeitsprofil ermittelt.

Zusätzlich wurde der Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern mit Hilfe der Korrelation nach Pearson berechnet.

Um die Entstehung der zeitlichen Invarianz beobachten zu können, erfolgte anschließend für jeden Probanden die Berechnung der Quotienten der Bewegungszeiten in den ausgewerteten Strecken. Diese waren bei Figur 1 der Quotient der Strecken 1 / 2, bei Figur 2 und 3 jeweils der Quotient der Strecken 3 / 1 (Quotient 1) und der Quotient der Strecken 4 / 2 (Quotient 2).

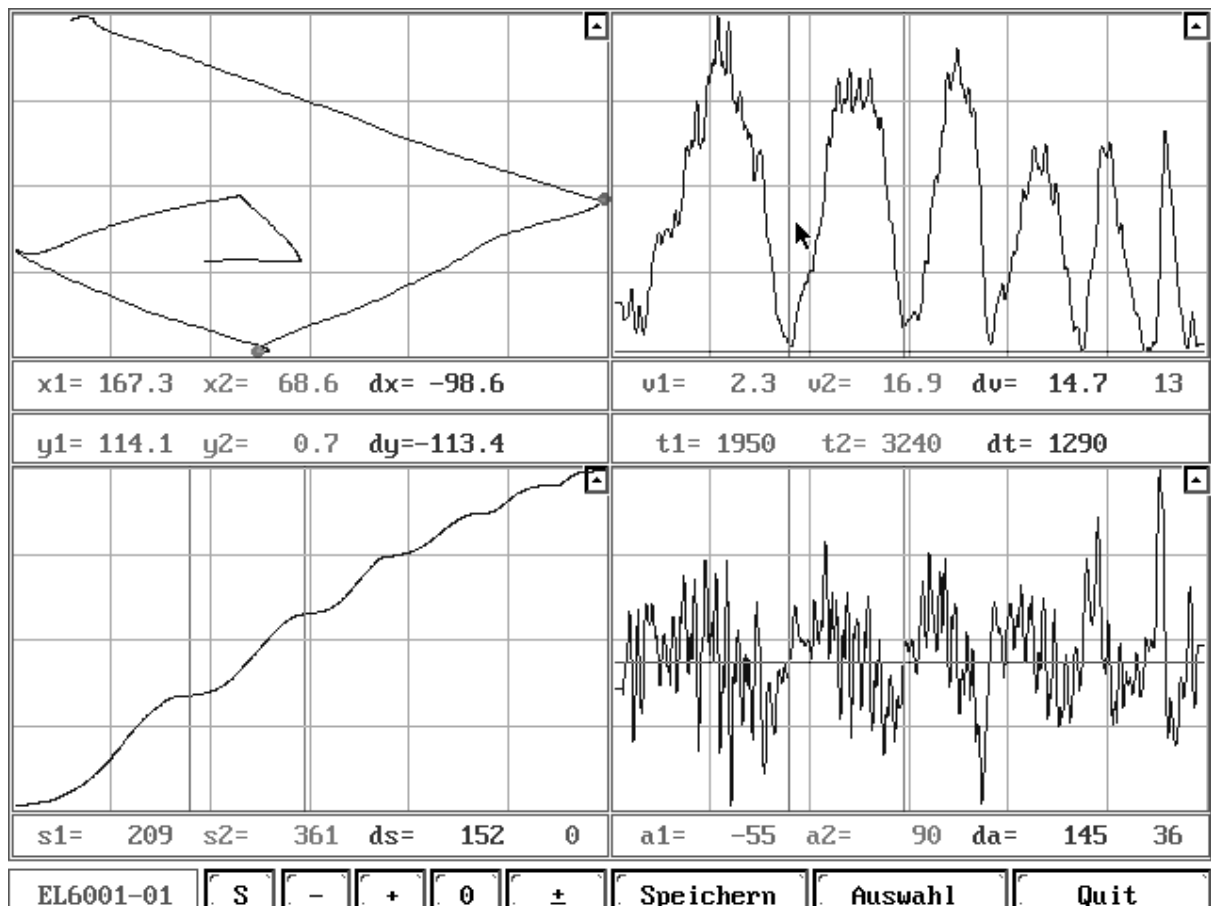


Abbildung 2.2: Bildschirm bei der Auswertung. Links oben ist die Bewegungsspur in der y-Projektion, rechts oben das Geschwindigkeitsprofil (v_y), links unten der zurückgelegte Weg (s_y) und rechts unten das Beschleunigungsprofil (a_y) zu erkennen. Im Geschwindigkeitsprofil wurden zwei Markierungen gesetzt, in den darunter liegenden Balken sind die entsprechenden Werte ablesbar.

Die errechneten Mittelwerte der Durchführungszeiten und deren Quotienten sowie die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel wurden zur Analyse von Mittelwertsunterschieden getrennt nach Händen innerhalb der Gruppen mit dem Wilcoxon-Test verglichen.

Zur Beurteilung der Veränderungen (Performanceverbesserung) der Parameter im Verlauf der Übungsblöcke und der Transfereffekte sind jeweils die Anfangs- und Endpunkte der aufgezeichneten Datenreihen von Interesse.

Um bilaterale Transfereffekte darzustellen, wurde jeweils der erste Durchgang der aufeinanderfolgenden Hände sowie der Übergang vom letzten Durchgang der ersten Hand zum ersten Durchgang der zweiten Hand mit Hilfe des Wilcoxon-Tests überprüft.

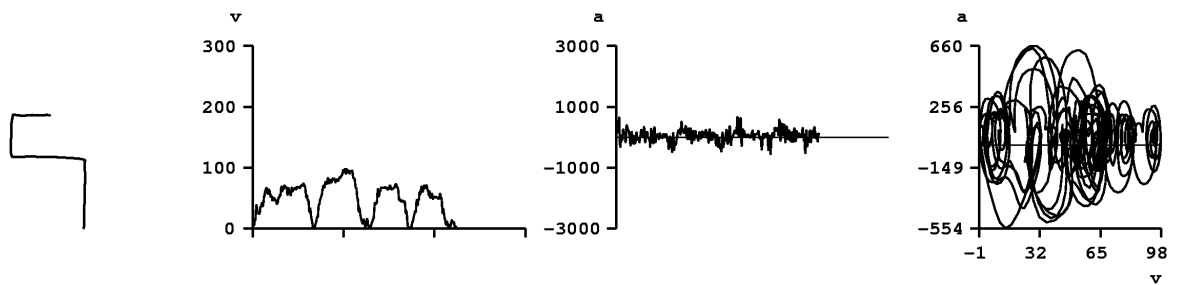
Um Lateralitätsunterschiede sowie eine möglicherweise bevorzugte Transfer-richtung aufzudecken, wurden die Leistungen der beiden Gruppen gegenübergestellt. Dazu wurden wiederum die Werte der obengenannten Parameter am Anfang und/oder Ende der Übungsblöcke der jeweiligen Hand für die Einzelstrecken einer Überprüfung mittels des Kruskal-Wallis Tests (U-Test nach Mann-Whitney) unterzogen.

Durch eine Korrelation der Werte der Durchführungszeiten und der Anzahl der Wechsel im Geschwindigkeitsprofil sollte festgestellt werden, ob sich ein Zusammenhang dieser beiden Parameter zeigt.

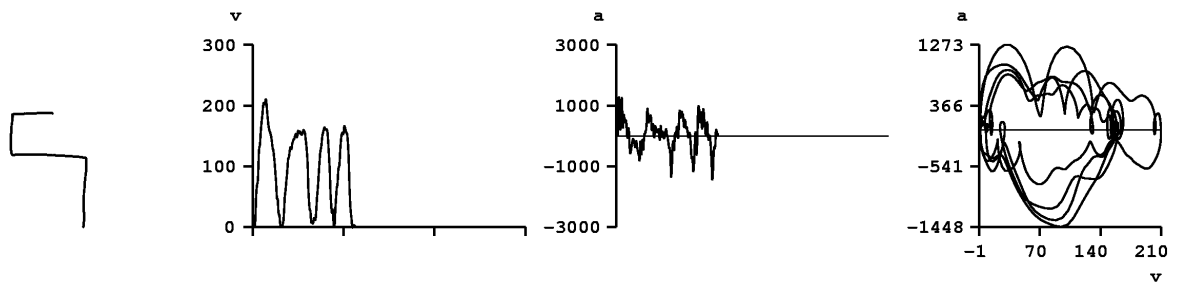
Darüber hinaus erschien es aufgrund der deutlichen Schwankungen in den Kurvenverläufen sinnvoll, die ersten und letzten 3 Werte einer Übungsserie (einer Hand) für alle Parameter zu glätten, um die Zuverlässigkeit der Aussagen nicht zu gefährden. Dazu wurden diese 3 Werte der jeweiligen Rohdaten getrennt nach Proband für jede Hand und Strecke gemittelt, und daraus wiederum die Mittelwerte jeder Gruppen gebildet.

Um Veränderungen durch die Übung festzustellen, wurden die Werte der entsprechenden Parameter für die Gruppenergebnisse und die Einzelergebnisse der Probanden über den Verlauf der Übungsblöcke graphisch dargestellt. Zur Darstellung der Bewegungsqualität wurde für einzelne Probanden und Patienten zusätzlich jeweils die Bewegungsspur (Positionssignal in der y-Projektion), die Geschwindigkeitskurve (v_y), die Beschleunigungskurve (a_y) und ein Phasendiagramm aus Geschwindigkeit und Beschleunigung (a_y/v_y) für einen Durchgang abgebildet (Abb. 2.3). In einem Phasendiagramm wird für aufeinanderfolgende Zeitpunkte das jeweilige Wertepaar zweier aufeinander zu beziehender Variablen aufgetragen. Bei gleicher Ausführung der Bewegungssegmente liegen die Phasenkurven genau übereinander, unabhängig von der Form der Figur und den individuellen Eigenheiten der Schrift des Probanden.

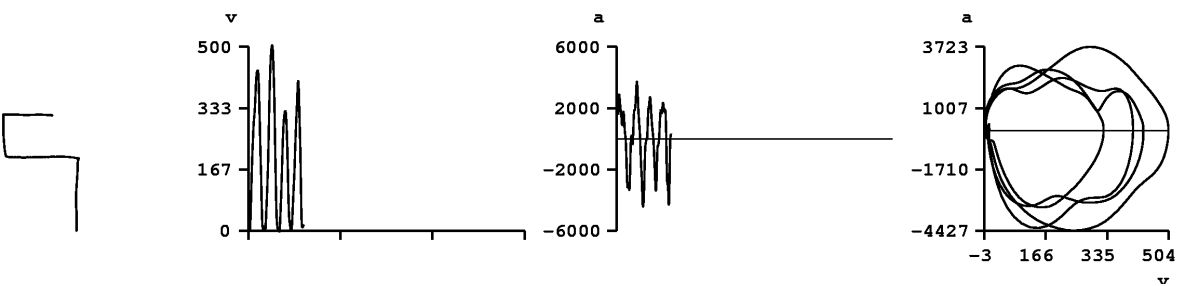
a)



b)



c)



d)

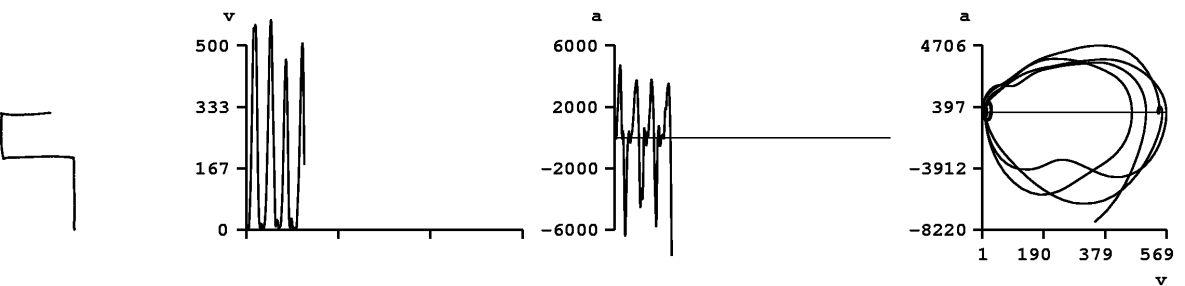


Abbildung 2.3 a-d: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsprofil, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm (von Geschwindigkeit und Beschleunigung) von links nach rechts für Figur 1.

a) zeigt eine bewusst kontrollierte Bewegung mit vielen Wechselln im Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil. Das Phasendiagramm ist undurchschaubar. d) zeigt eine weitestgehend automatisiert ablaufende Bewegung. Die Segmente des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofils sind eingipfelig, die Linien des Phasendiagramms liegen nahezu übereinander. b) und c) zeigen Zwischenstufen.

3. Ergebnisse

3.1 Experiment 1

Im Folgenden werden die Gruppenergebnisse der Durchführungszeiten, der Wechsel im Geschwindigkeitsverlauf (stellvertretend für die Automation einer Bewegung) und der Quotienten der Durchführungszeiten für verschiedene Wegstrecken (stellvertretend für die Entkoppelung der Durchführungszeit von der Bewegungsamplitude) dargestellt.

Die Bewegungszeiten werden mit T, die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (Peaks) mit P und die Quotienten der Bewegungszeiten mit Q abgekürzt.

Die im Text verwendeten Abkürzungen setzen sich zusammen aus:

Gruppe (1 oder 2), Parameter (T, P oder Q), Strecke (1 bis 4) bzw. Quotient (1 oder 2), Hand (R für die rechte oder L für die linke Hand), Durchgang (1 bis 20) bzw. Anfang oder Ende (A oder E) der Übung einer Hand nach Mittelwertbildung (im folgenden als Glättung bezeichnet) aus den Werte der ersten bzw. letzten 3 Durchgänge,

Es bedeutet also z.B. (2T1R20):

Gruppe 2 - Mittelwert der Durchführungszeiten - in Strecke 1 - der rechten Hand - beim 20. Versuch

oder (1Q2LA):

Gruppe 1 - Quotient 2 (Strecken 4 / 2) - der linken Hand - nach Glätten der ersten 3 Werte.

3.1.1 Durchführungszeiten in Figur 1

Die Durchführungszeiten der jeweils zehn Probanden einer Gruppe wurden gemittelt und sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Dabei begannen die Probanden der Gruppe 1 mit der rechten Hand und wechselten nach zwanzig Durchgängen zur Linken, die der Gruppe 2 begannen mit der linken Hand und wechselte zur Rechten.

Im Vergleich der durchschnittlichen Durchführungszeiten am Anfang und Ende des ersten Übungsblocks der ersten Hand war die Verbesserung für beide Gruppen in beiden Strecken signifikant (1T1R1 vs 1T1R20 $p=0.005$, 1T2R1 vs 1T2R20 $p=0.005$, 2T1L1 vs 2T1L20 $p=0.009$, 2T2L1 vs 2T2L20 $p=0.017$).

Eine Verkürzung der Bewegungszeiten zeigte sich auch in Gruppe 2 mit der zweiten (rechten) Hand (2T1R1 vs 2T1R20 $p=0.022$, 2T2R1 vs 2T2R20 $p=0.047$); für Gruppe 1 ergaben sich für die zweite Hand (linke Hand) keine signifikanten Veränderungen mehr (1T1L1 vs 1T1L20 $p=0.114$, 1T2L1 vs 1T2L20 $p=0.214$).

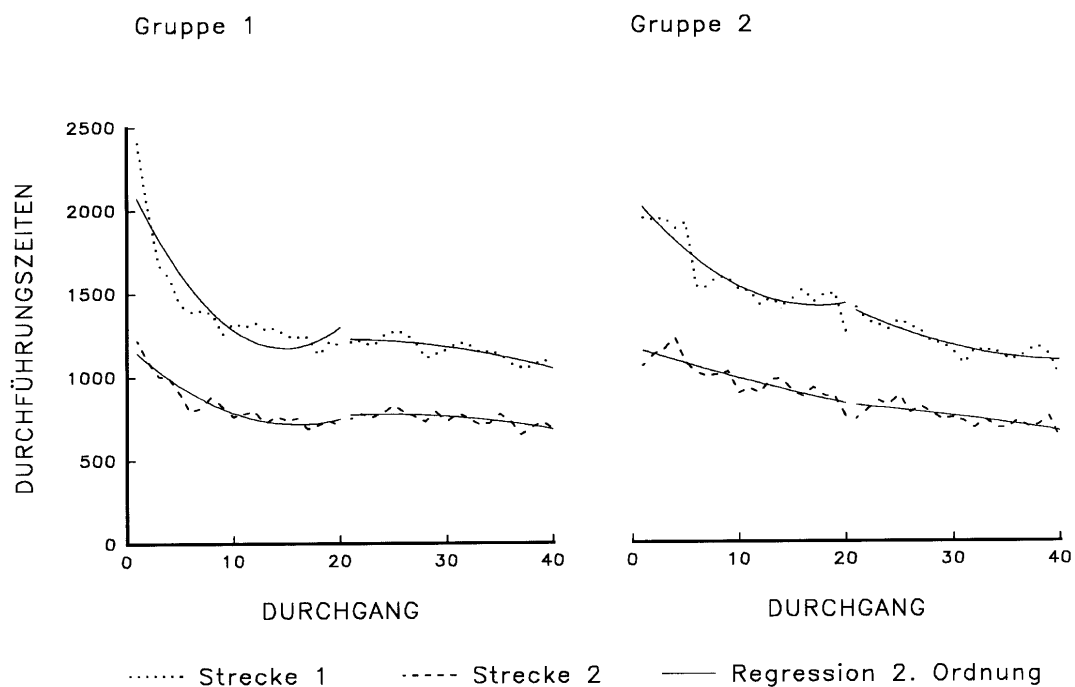


Abbildung 3.1: Mittelwerte der Durchführungszeiten der Strecken 1 und 2 (14 und 7 cm) beider Gruppen in Figur 1.

Um zufällige und möglicherweise verfälschende Einflüsse einzelner Schwankungen im Kurvenverlauf auszugleichen, wurden die Werte der jeweils ersten und letzten 3 Durchgänge der entsprechenden Hand und Strecke der jeweiligen Person gemittelt. Verglich man die geglätteten Anfangs- und Endwerte der ersten Hand miteinander, so zeigten sich ebenfalls signifikante Verbesserungen für beide Gruppen in beiden Strecken (1T1RA vs 1T1RE $p=0.005$, 1T2RA vs 1T2RE $p=0.005$, 2T1LA vs 2T1LE $p=0.009$, 2T2LA vs 2T2LE $p=0.009$).

Eine solche Verbesserung wurde nach Glättung der Kurve nach dem Wechsel zur zweiten Hand in Gruppe 2 nurmehr für die lange Strecke erreicht und ließ sich in Gruppe 1 wiederum nicht nachweisen (2T1RA vs 2T1RE $p=0.047$, 2T2RA vs 2T2RE $p=0.059$, 1T1LA vs 1T1LE $p=0.093$, 1T2LA vs 1T2LE $p=0.214$).

Nachdem also beide Gruppen mit der ersten Hand primär einen klaren Lernerfolg verzeichnen konnten, wurde dieser nach dem Wechsel zur zweiten Hand in Gruppe 1 nicht mehr fortgesetzt.

Die Ergebnisse nach Glättung der Werte werden im Folgenden nicht mehr im einzelnen aufgeführt, wenn sie in ihrer Aussage mit den ursprünglichen Daten übereinstimmen.

Transfer 1

Um bilaterale Transfereffekte zu überprüfen, wurden die Bewegungszeiten der ersten und zweiten Hand am Anfang des Übungsblocks innerhalb einer Gruppe miteinander verglichen. Im weiteren Text werden diese Ergebnisse unter "Transfer 1" besprochen. Im Falle positiver Transfereffekte müßten sich am Anfang des Übungsblocks der zweiten Hand, verglichen mit den Ausgangswerten der ersten Hand, signifikant kürzere Bewegungszeiten ergeben.

Für beide Gruppen zeigte sich in beiden Strecken, daß die zweite Hand am Anfang des Übungsblocks mit signifikant besseren Bewegungszeiten beginnen konnte (1T1R1 vs 1T1L1 $p=0.007$, 1T2R1 vs 1T2L1 $p=0.007$, 2T1L1 vs 2T1R1 $p=0.009$, 2T2L1 vs 2T2R1 $p=0.022$).

Transfer 2

Zusätzlich wurden innerhalb der Gruppen die Werte des letzten Durchgangs der ersten Hand mit denen des ersten Durchgangs der zweiten Hand verglichen. Im weiteren Text werden diese Ergebnisse unter "Transfer 2" besprochen.

Bei positiven Transfereffekten würde man, außer bei einer deutlichen Verbesserung, eine Ähnlichkeit der Werte, also keine signifikanten Mittelwertsunterschiede erwarten. In der Tat waren für keine der Strecken der beiden Gruppen signifikante Unterschiede zu finden, so daß man eine Übertragung von Erlerntem implizieren kann (1T1R20 vs 1T1L1 $p=0.575$, 1T2R20 vs 1T2L1 $p=0.169$, 2T1L20 vs 2T1R1 $p=0.114$, 2T2L20 vs 2T2R1 $p=0.959$).

Es ergaben sich also klare Hinweise auf eine bilaterale Übertragung von neu erworbenen Verhaltensänderungen. Für die Bewegungszeiten waren die Verbesserungen im ersten Übungsblock, wie oben beschrieben, klar zu belegen. Dies ist insofern wichtig, da die beiden Möglichkeiten Transfereffekte nachzuweisen eine relativ sichere Aussage über einen Lernerfolg zulassen, sofern vorher (im ersten Übungsblock) eine Leistungsverbesserung stattgefunden hat. Bei gleichbleibender Leistung im ersten Übungsblock ließe sich keine Übertragung einer Leistungsverbesserung nachweisen.

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Um mögliche, vorbestehende Unterschiede in der initialen Leistung der beiden Hände, und somit eine schon vorhandene Lateralisierung bezüglich dieser Aufgabe, beurteilen zu können, wurden die Leistungen der ersten Hand der ersten Gruppe mit der ersten Hand der zweiten Gruppe verglichen. In gleicher Weise wurde mit der jeweils zweiten Hand verfahren. Verglichen wurden die Leistungen Hände jeweils am Anfang bzw. am Ende des entsprechenden Übungsblocks. Diese Ergebnisse werden im weiteren Text unter "Vorbestehende Lateralisierung" besprochen.

Der Vergleich der Durchführungszeiten zwischen den Gruppen am Anfang und Ende der Übungsblöcke ergab für beide Strecken weder für die erste Hand noch für die zweite Hand signifikante Mittelwertsunterschiede (1T1R1 vs 2T1L1 $p=0.406$, 1T2R1 vs 2T2L1 $p=0.940$, 1T1L1 vs 2T1R1 $p=0.650$, 1T2L1 vs 2T2R1 $p=0.545$, 1T1R20 vs 2T1L20 $p=0.821$, 1T2R20 vs 2T2L20 $p=0.623$, 1T1L20 vs 2T1R20 $p=0.496$, 1T2L20 vs 2T2R20 $p=0.272$).

Es ließ sich demnach aus den Leistungen der beiden Hände hinsichtlich der benötigten Durchführungszeiten weder am Anfang noch am Ende der Übungsblöcke ein signifikanter vorbestehender Unterschied eruieren.

Reihenfolgeeffekte

Zur Bestimmung möglicher Reihenfolgeeffekte für die zuerst verwendete Hand wurden die jeweils selben Hände (also z.B. jeweils die linke Hand) der beiden Gruppen miteinander verglichen. Diese Ergebnisse werden im weiteren Text unter "Reihenfolgeeffekte" besprochen. Dabei ist zu erwarten, daß jene Probanden, die

mit der kontralateralen Hand schon geübt hatten, durch die beschriebenen Transfereffekte am Anfang des nachfolgenden Übungsblocks einen Vorteil haben. Es zeigte sich, wie erwartet, beim Vergleich der jeweils linken Hand für beide Strecken am Anfang, aber nicht am Ende des Übungsblocks, ein signifikanter Vorteil der ersten Gruppe (1T1L1 vs 2T1L1 $p=0.007$, 1T2L1 vs 2T2L1 $p=0.019$, 1T1L20 vs 2T1L20 $p=0.174$, 1T2L20 vs 2T2L20 $p=0.326$).

Zudem trat auch beim Vergleich der jeweils rechten Hand ein signifikanter Vorteil der ersten Gruppe am Anfang der Übungsblöcke in der kurzen Strecke zutage; für die lange Strecke war der Unterschied nicht signifikant.

Am Ende der Übungsblöcke war wiederum kein Unterschied zu finden (1T1R1 vs 2T1R1 $p=0.131$, 1T2R1 vs 2T2R1 $p=0.019$, 1T1R20 vs 2T1R20 $p=0.496$, 1T2R20 vs 2T2R20 $p=0.364$).

Nach der Glättung war der Mittelwertsunterschied am Anfang des Übungsblocks nicht mehr signifikant (1T1RA vs 2T1RA $p=0.082$, 1T2RA vs 2T2RA $p=0.070$, 1T1RE vs 2T1RE $p=0.940$, 1T2RE vs 2T2RE $p=0.821$).

Trotz der initial unerwartet schwächeren Leistung der rechten Hand der zweiten Gruppe (als zweiter Hand) zeigte sich am Ende beider Übungsblöcke, daß beide Gruppen mit beiden Händen dasselbe Leistungsniveau erreichten, und die Reihenfolge der Verwendung der Hände für diese Aufgabe letztlich keine entscheidende Rolle spielte.

3.1.2 Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 1

Wie oben bereits beschrieben, wurde als Maß für die Automation und Glätte einer Bewegung die Anzahl Wechsel im Geschwindigkeitsprofil herangezogen.

Im Vergleich der durchschnittlichen Anzahl der Geschwindigkeitswechsel am Anfang und Ende der Übungsblöcke war die Verbesserung für beide Gruppen in beiden Strecken mit der ersten Hand signifikant (1P1R1 vs 1P1R20 $p=0.005$, 1P2R1 vs 1P2R20 $p=0.007$, 2P1L1 vs 2P1L20 $p=0.008$, 2P2L1 vs 2P2L20 $p=0.021$).

Diese Abnahme der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel erwies sich in Gruppe 1 nach dem Wechsel zur zweiten (linken) Hand primär als nicht signifikant (1P1L1 vs 1P1L20 $p=0.138$, 1P2L1 vs 1P2L20 $p=0.079$).

In Gruppe 2 fand sich auch nach dem Wechsel zur zweiten Hand eine signifikante Verbesserung (2P1R1 vs 2P1R20 $p=0.008$, 2P2R1 vs 2P2R20 $p=0.012$).

Nach der Glättung der Kurven der jeweiligen zweiten Hand zeigte sich die signifikante Verbesserung in beiden Strecken für Gruppe 2. Zusätzlich erreichte die erste Gruppe in der kurzen Strecke ebenfalls die Signifikanz (2P1RA vs 2P1RE $p=0.013$, 2P2RA vs 2P2RE $p=0.022$, 1P1LA vs 1P1LE $p=0.114$, 1P2LA vs 1P2LE $p=0.007$).

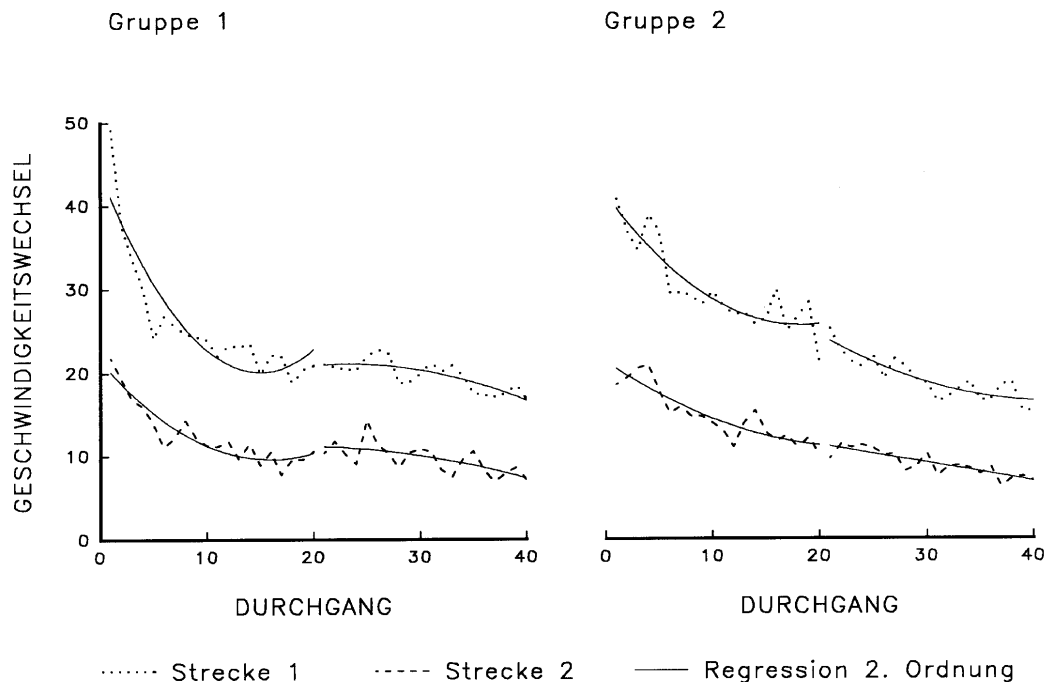


Abbildung 3.2: Mittelwerte der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel der Strecken 1 und 2 beider Gruppen in Figur 1.

Es ergab sich also für beide Gruppen für die erste Hand eine klare Abnahme der Richtungswechsel im Geschwindigkeitsverlauf, die auf eine beginnende Automation der Bewegung schließen lässt. Eine weitere Verbesserung der Automation mit der zweiten Hand wie für Gruppe 2, war für Gruppe 1 nur mehr für die kurze Strecke darzustellen.

Transfer 1

In beiden Gruppen zeigte sich für beide Strecken klar, daß die jeweils zweite Hand ein signifikant besseres Ausgangsniveau hatte (1P1R1 vs 1P1L1 $p=0.005$, 1P2R1 vs 1P2L1 $p=0.011$, 2P1L1 vs 2P1R1 $p=0.012$, 2P2L1 vs 2P2R1 $p=0.021$).

Transfer 2

Die verglichenen Werte waren für beide Gruppen nicht signifikant unterschiedlich (1P1R20 vs 1P1L1 $p=0.833$, 1P2R20 vs 1P2L1 $p=0.952$, 2P1L20 vs 2P1R1 $p=0.074$, 2P2L20 vs 2P2R1 $p=0.596$), so daß ein Transfer der erlernten Bewegung anzunehmen ist.

Wie für die Durchführungszeiten waren auch für die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel sowohl die Verbesserungen im ersten Übungsblock, als auch eine bilaterale Übertragung von neu erworbenen Verhaltensänderungen klar zu belegen. Dadurch läßt sich ein Lernerfolg relativ sicher implizieren.

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Am Anfang der Übungsblöcke ergaben sich keine signifikanten Unterschiede (1P1R1 vs 2P1L1 $p=0.596$, 1P2R1 vs 2P2L1 $p=0.496$, 1P1L1 vs 2P1R1 $p=0.404$, 1P2L1 vs 2P2R1 $p=0.869$).

Auch der Vergleich der Hände am Ende der Übungsblöcke ergab weder für die erste noch für die zweite Hand signifikante Unterschiede (1P1R20 vs 2P1L20 $p=0.677$, 1P2R20 vs 2P2L20 $p=0.939$, 1P1L20 vs 2P1R20 $p=0.570$, 1P2L20 vs 2P2R20 $p=0.902$).

Es ergab sich also kein Hinweis auf einen Vorteil einer Hemisphäre hinsichtlich der anfänglichen Glätte der Bewegung oder der Ausbildung der Automation einer Bewegung.

Reihenfolgeeffekte

Es zeigte sich im Vergleich der jeweils linken Hand für Strecke 1 am Anfang, aber nicht am Ende des Übungsblocks ein signifikanter Vorteil der ersten Gruppe (1P1L1 vs 2P1L1 $p=0.019$, 1P2L1 vs 2P2L1 $p=0.095$, 1P1L20 vs 2P1L20 $p=0.426$, 1P2L20 vs 2P2L20 $p=0.237$).

Der Vergleich der beiden Strecken der jeweils rechten Hand brachte einen Vorteil der zweiten Gruppe am Anfang des Übungsblocks in der kurzen Strecke zutage (1P1R1 vs 2P1R1 $p=0.082$, 1P2R1 vs 2P2R1 $p=0.015$, 1P1R20 vs 2P1R20 $p=0.324$, 1P2R20 vs 2P2R20 $p=0.270$).

Durch die Glättung ergab sich dagegen am Anfang des Übungsblocks ein signifikanter Vorteil der zweiten Gruppe in der langen Strecke (1P1RA vs 2P1RA

$p=0.049$, 1P2RA vs 2P2RA $p=0.058$, 1P1RE vs 2P1RE $p=0.544$, 1P2RE vs 2P2RE $p=0.472$).

Wie vermutet war am Anfang des zweiten Übungsblocks ein leichter Vorteil der jeweiligen Gruppe zu verzeichnen, die bereits im ersten Übungsblock mit der anderen Hand trainiert hatte. Am Ende des Übungsblocks erreichten jedoch beide Gruppen wieder ein ähnliches Niveau in der Glätte der Bewegung. Dies bestätigt indirekt den kontralateralen Transfer und zeigt, daß zumindest für diese Übung Reihenfolgeeffekte hinsichtlich der Automation der Bewegung keine Rolle spielen.

3.1.3 Konstante Figurzeit in Figur 1

Bei hochüberlernten Bewegungen ist eine relative zeitliche Invarianz zu erwarten, also die Unabhängigkeit der Bewegungszeit von der Bewegungsamplitude.

Um angehende Effekte dieser zeitlichen Invarianz darzustellen wurden die beiden Strecken mittels eines Quotienten der Bewegungszeiten miteinander verglichen, der in Abbildung 3.3 dargestellt ist.

Da anfangs keine zeitliche Invarianz vorhanden sein sollte, müßte der Quotient aufgrund des Längenverhältnisses der verglichenen Strecken (14 cm und 7 cm), zuerst etwa 2 betragen und sich mit fortgesetzter Übung dem Wert 1 annähern.

Der Vergleich der durchschnittlichen Quotienten am Anfang und Ende des Übungsblocks zeigte für keine der beiden Hände in keiner der Gruppen eine signifikante Abnahme der Werte (1QR1 vs 1QR20 $p=0.508$, 2QL1 vs 2QL20 $p=0.333$, 2QR1 vs 2QR20 $p=0.093$, 1QL1 vs 1QL20 $p=0.646$).

Für die zweite Hand ergab sich in Gruppe 2 eine tendenzielle Verbesserung, diese ließ sich in Gruppe 1 jedoch nicht nachweisen.

Wie für die vorhergehenden Parameter wurde auch für die Quotienten eine Glättung der jeweils ersten und letzten 3 Werte der Übungsblöcke vorgenommen, da insbesondere diese Werte ausgeprägten Schwankungen unterlagen (Abb. 3.4). Auch im Vergleich der geglätteten Quotienten der Anfangs- und Endwerte eines Übungsblocks der jeweiligen Hand zeigte sich für keine Gruppe eine signifikante Verbesserung (1QRA vs 1QRE $p=0.074$, 1QLA vs 1QLE $p=0.386$, 2QLA vs 2QLE $p=0.333$, 2QRA vs 2QRE $p=0.203$).

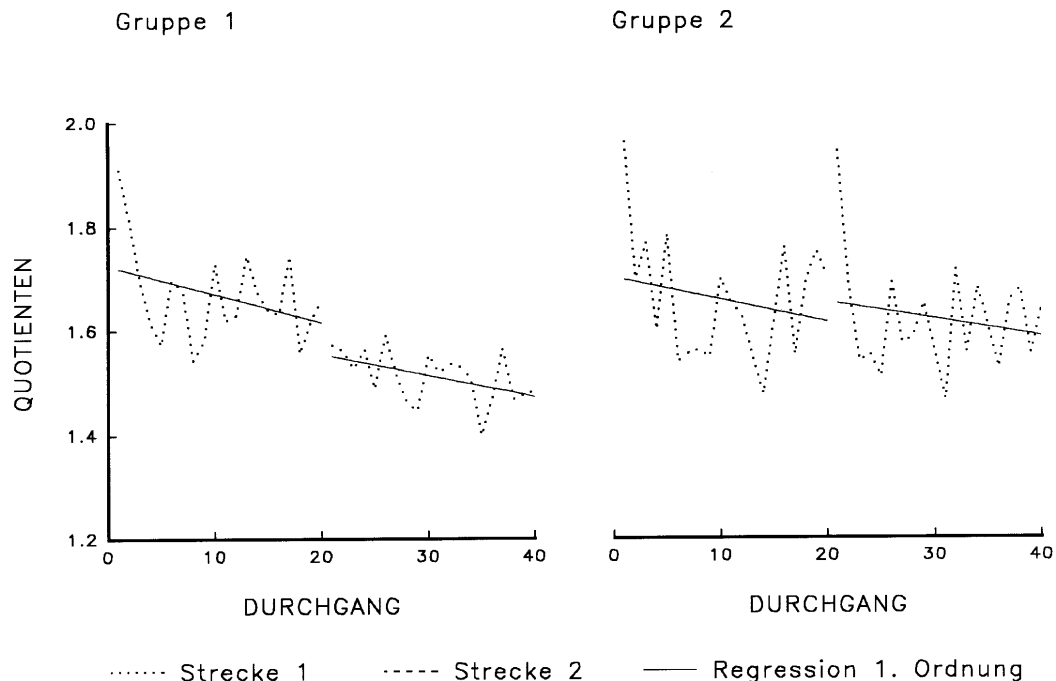


Abbildung 3.3: Mittelwerte der Quotienten der Durchführungszeiten beider Gruppen für Figur 1.

Daher wurden die Werte über den gesamten Übungsverlauf der jeweiligen Gruppe, also von Anfang des ersten Übungsblocks bis zum Abschluß des zweiten Übungsblocks, verglichen. Es zeigte sich zunächst nur für Gruppe 2 eine signifikante Abnahme der Werte (1QR1 vs 1QL20 $p=0.093$, 2QL1 vs 2QR20 $p=0.047$).

Nach der Glättung wurde diese hingegen für beide Gruppen erreicht (1QRA vs 1QLE $p=0.017$, 2QLA vs 2QRE $p=0.047$).

Es ergaben sich somit in den einzelnen Übungsblöcken keine, im Gesamtversuch aber doch Hinweise für eine Abnahme des Quotienten. Eine tatsächliche konstante Bewegungszeit unabhängig von der Amplitude konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Transfer 1

Beim Vergleich der Quotienten der ersten und zweiten Hand am Anfang der Übungsblöcke innerhalb der Gruppe ergab für keine Gruppe signifikanter Unterschied (1QR1 vs 1QL1 $p=0.093$, 2QL1 vs 2QR1 $p=0.878$).

Nach der Glättung der Werte zeigte sich für Gruppe 1 eine signifikante Verbesserung des Quotienten am Anfang des zweiten Übungsblocks (1QRA vs 1QLA $p=0.028$).

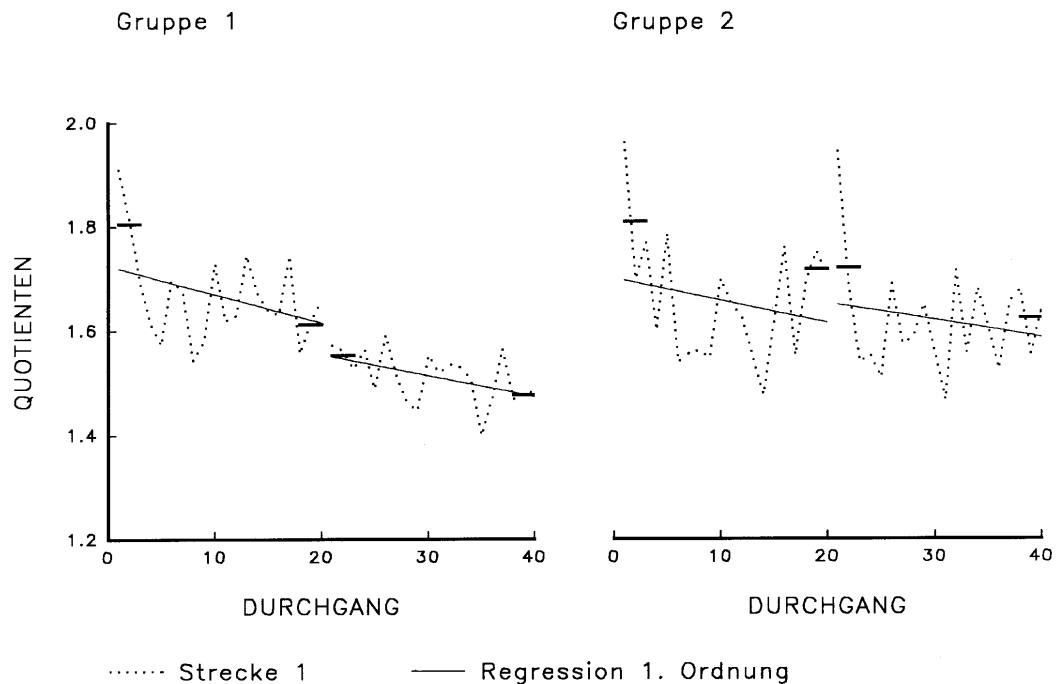


Abbildung 3.4: geglättete Werte am Anfang und Ende der Übungsblöcke der Quotienten der Durchführungszeiten beider Gruppen für Figur 1.

Transfer 2

Der Vergleich der Werte beim Handwechsel zeigte, im Gegensatz zu Gruppe 1, nur für Gruppe 2 einen signifikanten Unterschied der Werte in Form einer Verschlechterung der Leistung nach dem Handwechsel (2QL20 vs 2QR1 $p=0.037$, 1QR20 vs 1QL1 $p=0.508$).

Nach Glättung dieser Werte erreichte auch Gruppe 2 (2QLE vs 2QRA $p=0.333$) eine Ähnlichkeit der Werte.

Obwohl nur geringe Verbesserungen in den einzelnen Übungsblöcken dargestellt werden konnten, ließen sich für Gruppe 1 deutliche Hinweise für Transfereffekte der aufgebauten zeitlichen Strukturen nachweisen. Für die zweite Gruppe waren diese, wie in Abbildung 3.4 gut zu erkennen ist, nicht zu belegen.

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Der Vergleich der Gruppen am Anfang der Übungsblöcke ergab für die erste Hand einen signifikanten Vorteil der Gruppe 2, der für die zweite Hand nicht bestand (1QR1 vs 2QL1 $p=0.016$, 1QL1 vs 2QR1 $p=0.597$).

Derselbe Vergleich am Ende der Übungsblöcke zeigte keinen signifikanten Unterschied (1Q1R20 vs 2Q1L20 $p=0.880$, 1Q1L20 vs 2Q1R20 $p=0.705$).

Nach der Glättung zeigte sich weder am Anfang noch am Ende ein signifikanter Unterschied, so daß man wahrscheinlich nicht von einer tatsächlichen Lateralisierung der aufgebauten zeitlichen Strukturen ausgehen kann (1QRA vs 2QLA $p=0.257$, 1QLA vs 2QRA $p=0.650$, 1Q1RE vs 2Q1LE $p=0.450$, 1Q2LE vs 2Q2RE $p=0.326$).

Reihenfolgeeffekte

Dabei zeigte sich im Vergleich der Quotienten der jeweils linken Hand am Anfang, aber nicht am Ende des Übungsblocks, ein signifikanter Vorteil der ersten Gruppe (1QL1 vs 2QL1 $p=0.049$, 1QL20 vs 2QL20 $p=0.257$).

Derselbe Vergleich für die rechte Hand zeigte jedoch weder am Anfang noch am Ende einen signifikanten Unterschied (1QR1 vs 2QR1 $p=0.597$, 1QR20 vs 2QR20 $p=0.762$).

Der Vorteil der ersten Gruppe am Anfang des Übungsblocks der linken Hand dürfte durch die vorhergehende Übung mit der rechten Hand erklärbar sein. Im Gegensatz dazu war ein solcher Vorteil für die rechte Hand der zweiten Gruppe zu nicht nachzuweisen. Das mag daran liegen, daß in Gruppe 2, wie oben schon erwähnt, wahrscheinlich keine kontralaterale Übertragung der erworbenen zeitlichen Strukturen stattgefunden hat, und somit der Vorteil der vorhergehenden Übung nicht entstehen konnte. Dies könnte ein Hinweis dafür sein, daß die Reihenfolge der Übung der Hände möglicherweise beim Aufbau einer zeitlichen Struktur einer Bewegung von Bedeutung ist.

3.1.4 Korrelation von Durchführungszeiten und Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 1

Aus den bisher dargestellten Ergebnissen ist ersichtlich, daß sowohl die Durchführungszeiten als auch die Anzahl der Wechsel im Geschwindigkeitsprofil im Verlauf der Übung abnehmen

Um einen möglichen Zusammenhang der Durchführungszeiten mit der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel aufzudecken, wurden diese beiden Parameter miteinander korreliert.

Beschrieben sind im Folgenden die individuellen Mittelwerte am Anfang und Ende der Übungsblöcke.

In Gruppe 1 zeigte sich mit der rechten (ersten) Hand sowohl am Anfang als auch am Ende des Übungsblocks für beide Strecken ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel und der Bewegungszeit (1T1R1 * 1P1R1 $r=0.997$ $p=0.000$, 1T2R1 * 1P2R1 $r=0.969$ $p=0.000$, 1T1R20 * 1P1R20 $r=0.966$ $p=0.000$, 1T2R20 * 1P2R20 $r=0.975$ $p=0.000$).

Für die linke (zweite) Hand ergaben sich in Gruppe 1 ebenso signifikante Korrelationen für beide Strecken am Anfang und Ende des Übungsblocks (1T1L1 * 1P1L1 $r=0.939$ $p=0.000$, 1T2L1 * 1P2L1 $r=0.968$ $p=0.000$, 1T1L20 * 1P1L20 $r=0.977$ $p=0.000$, 1T2L20 * 1P2L20 $r=0.956$ $p=0.000$).

In Gruppe 2 war eine positive Korrelation für die linke (erste) Hand am Anfang und am Ende des Übungsblocks nachzuweisen, die Korrelationskoeffizienten waren jedoch etwas niedriger (2T1L1 * 2P1L1 $r=0.837$ $p=0.003$, 2T2L1 * 2P2L1 $r=0.920$ $p=0.000$, 2T1L20 * 2P1L20 $r=0.937$ $p=0.000$, 2T2L20 * 2P2L20 $r=0.792$ $p=0.006$).

Mit der rechten (zweiten) Hand waren die Korrelationskoeffizienten der zweiten Gruppe wiederum merklich niedriger als in Gruppe 1, so daß die Signifikanz am Anfang der kurzen Strecke nicht mehr erreicht wurde (2T1R1 * 2P1R1 $r=0.783$ $p=0.007$, 2T2R1 * 2P2R1 $r=0.597$ $p=0.068$, 2T1R20 * 2P1R20 $r=0.764$ $p=0.010$, 2T2R20 * 2P2R20 $r=0.848$ $p=0.002$).

Es zeigte sich also, daß für beide Gruppen ein klarer Zusammenhang zwischen den Bewegungszeiten und den Geschwindigkeitswechseln bestand. Im Gegensatz zu Gruppe 1 waren die Korrelationskoeffizienten in der zweiten Gruppe jedoch insbesondere mit der zweiten (rechten) Hand niedriger, z.T. war keine Korrelation mehr nachweisbar.

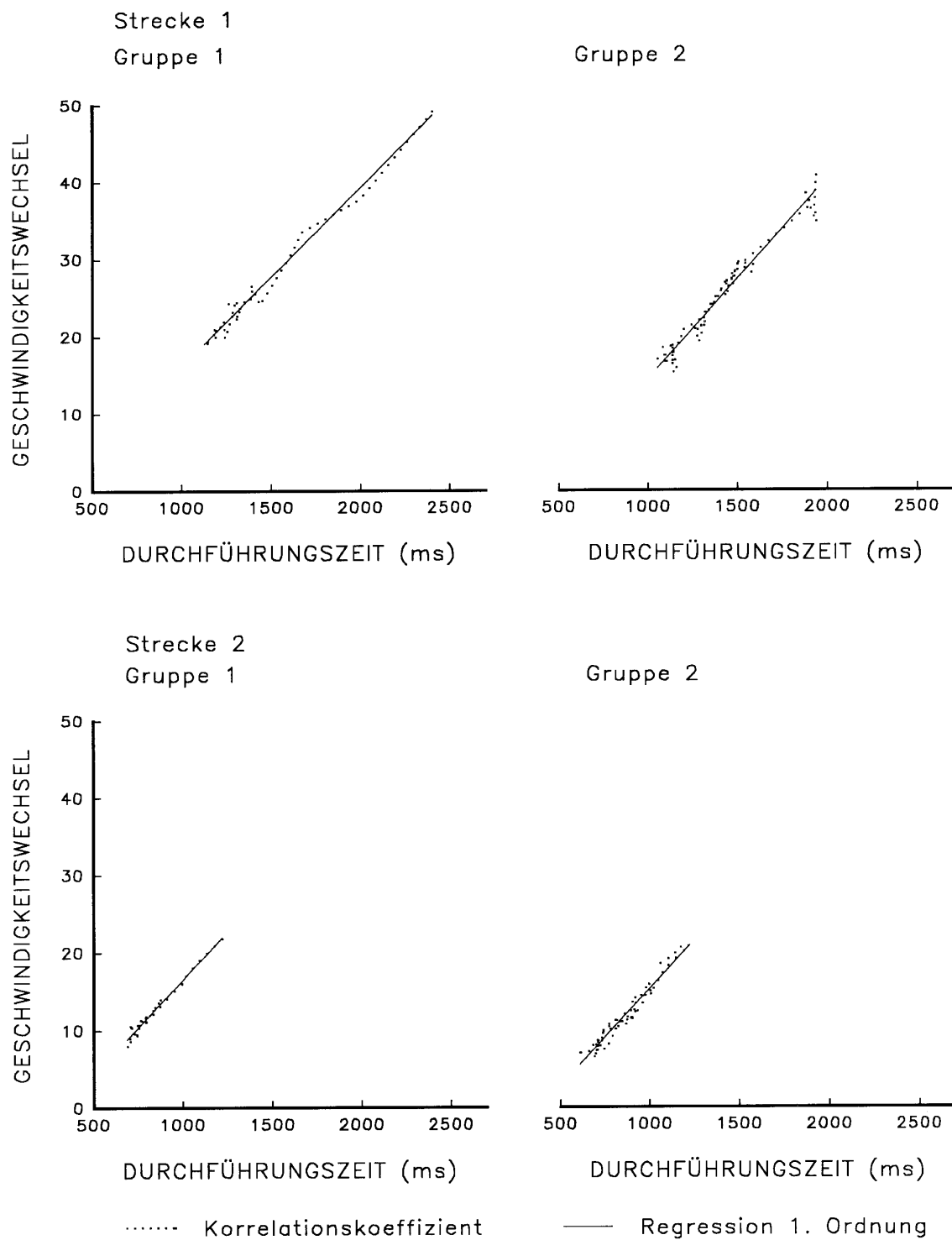


Abbildung 3.5: Mittelwerte der Durchführungszeiten für Strecke 1 und 2 in Figur 1, die gegen die Mittelwerte der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel aufgetragen sind.

3.2 Experiment 2

3.2.1.1 Durchführungszeiten in Figur 2

Im Vergleich der durchschnittlichen Bewegungszeiten am Anfang und Ende des Übungsblocks der ersten Hand war die Verbesserung für die vier ausgewerteten Strecken für beide Gruppen signifikant (1T1R1 vs 1T1R20 $p=0.005$, 1T2R1 vs 1T2R20 $p=0.007$, 1T3R1 vs 1T3R20 $p=0.005$, 1T4R1 vs 1T4R20 $p=0.005$, 2T1L1 vs 2T1L20 $p=0.005$, 2T2L1 vs 2T2L20 $p=0.005$, 2T3L1 vs 2T3L20 $p=0.007$, 2T4L1 vs 2T4L20 $p=0.009$).

Nach dem Wechsel zur zweiten Hand zeigte sich in Gruppe 1 (linke Hand) nur mehr für Strecke 3 eine signifikante Verbesserung (1T1L1 vs 1T1L20 $p=0.285$, 1T2L1 vs 1T2L20 $p=0.059$, 1T3L1 vs 1T3L20 $p=0.017$, 1T4L1 vs 1T4L20 $p=0.241$); Gruppe 2 verfehlte mit der rechten Hand die Signifikanz für alle 4 Strecken knapp (2T1R1 vs 2T1R20 $p=0.086$, 2T2R1 vs 2T2R20 $p=0.074$, 2T3R1 vs 2T3R20 $p=0.059$, 2T4R1 vs 2T4R20 $p=0.059$).

Für die zweite (rechte) Hand in Gruppe 2 zeigte sich nach der Glättung jedoch für alle Strecken eine signifikante Verkürzung der Durchführungszeiten, (2T1RA vs 2T1RE $p=0.028$, 2T2RA vs 2T2RE $p=0.005$, 2T3RA vs 2T3RE $p=0.047$, 2T4RA vs 2T4RE $p=0.037$).

Verglich man die geglätteten Anfangs- und Endwerte der zweiten Hand, so zeigte sich für Gruppe 1 (linke Hand) in Strecke 2 eine signifikante Verbesserung (1T1LA vs 1T1LE $p=0.241$, 1T2LA vs 1T2LE $p=0.022$, 1T3LA vs 1T3LE $p=0.169$, 1T4LA vs 1T4LE $p=0.386$).

Nach einer klaren Verbesserung beider Gruppen mit der jeweils ersten Hand erreichte die zweite Gruppe mit der zweiten (rechten) Hand eine weitere Abnahme der Durchführungszeiten, die sich für Gruppe 1 mit der linken (zweiten) Hand kaum mehr nachweisen ließ.

Transfer 1

In Gruppe 1 zeigte sich für alle 4 Strecken klar, daß die zweite Hand ein signifikant besseres Ausgangsniveau hatte (1T1R1 vs 1T1L1 $p=0.013$, 1T2R1 vs 1T2L1 $p=0.005$, 1T3R1 vs 1T3L1 $p=0.005$, 1T4R1 vs 1T4L1 $p=0.017$).

Auch in Gruppe 2 verfehlte nur Strecke 2 knapp die Signifikanz (2T1L1 vs 2T1R1 $p=0.005$, 2T2L1 vs 2T2R1 $p=0.074$, 2T3L1 vs 2T3R1 $p=0.005$, 2T4L1 vs 2T4R1 $p=0.008$).

Für beide Gruppen ergab sich nach der Glättung eine signifikante Abnahme der Bewegungszeiten in allen Strecken, so daß man von einem positiven Transfer ausgehen kann (1T1RA vs 1T1LA $p=0.028$, 1T2RA vs 1T2LA $p=0.005$, 1T3RA vs 1T3LA $p=0.005$, 1T4RA vs 1T4LA $p=0.007$, 2T1LE vs 2T1RA $p=0.005$, 2T2LA vs 2T2RA $p=0.007$, 2T3LA vs 2T3RA $p=0.005$, 2T4LA vs 2T4RA $p=0.005$).

Transfer 2

In Gruppe 1 ergaben sich für alle Strecken signifikante Unterschiede, die außer in Strecke 2 (Verbesserung) auf einer Verschlechterung beim Handwechsel beruhen (1T1R20 vs 1T1L1 $p=0.017$, 1T2R20 vs 1T2L1 $p=0.005$, 1T3R20 vs 1T3L1 $p=0.005$, 1T4R20 vs 1T4L1 $p=0.007$).

In Gruppe 2 zeigte sich jedoch als Hinweis für Transfereffekte, außer in Strecke 2 (Verschlechterung), kein signifikanter Unterschied (2T1L20 vs 2T1R1 $p=0.959$, 2T2L20 vs 2T2R1 $p=0.017$, 2T3L20 vs 2T3R1 $p=0.508$, 2T4L20 vs 2T4R1 $p=0.721$).

Nach Glättung entstand auch in Gruppe 1, neben der Verbesserung in Strecke 2, nur für Strecken 1 ein signifikanter Mittelwertsunterschied in Form einer Leistungsver schlechterung (1T1RE vs 1T1LA $p=0.028$, 1T2RE vs 1T2LA $p=0.028$, 1T3RE vs 1T3LA $p=0.241$, 1T4RE vs 1T4LA $p=0.333$).

Insgesamt waren in beiden Gruppen Transfereffekte hinsichtlich der Bewegungszeiten nachzuweisen. In dieser Aufgabe scheint der Transfer von der rechten auf die linke Hand

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Der Vergleich der Durchführungszeiten beider Gruppen am Anfang der Übungsblöcke ergab für die erste Hand keinen signifikanten Unterschied (1T1R1 vs 2T1L1 $p=0.545$, 1T2R1 vs 2T2L1 $p=0.199$, 1T3R1 vs 2T3L1 $p=0.199$, 1T4R1 vs 2T4L1 $p=0.545$).

Nach der Glättung der Daten ergab sich für die erste Hand für Strecke 3 ein Vorteil zugunsten der zweiten Gruppe, die übrigen Werte wurden bestätigt (1T1RA vs 2T1LA $p=0.705$, 1T2RA vs 2T2LA $p=0.151$, 1T3RA vs 2T3LA $p=0.041$, 1T4RA vs 2T4LA $p=0.199$). geringer zu sein.

Für die zweite Hand zeigte sich am Anfang der Übungsblöcke nur in Strecke 1 und tendenziell in Strecke 3 ein signifikanter Vorteil der Gruppe 2 (1T1L1 vs 2T1R1 $p=0.041$, 1T2L1 vs 2T2R1 $p=0.597$, 1T3L1 vs 2T3R1 $p=0.082$, 1T4L1 vs 2T4R1 $p=0.273$).

Nach der Glättung zeigten sich keine signifikanten Unterschiede (1T1LA vs 2T1RA $p=0.174$, 1T2LA vs 2T2RA $p=0.940$, 1T3LA vs 2T3RA $p=0.059$, 1T4LA vs 2T4RA $p=0.070$).

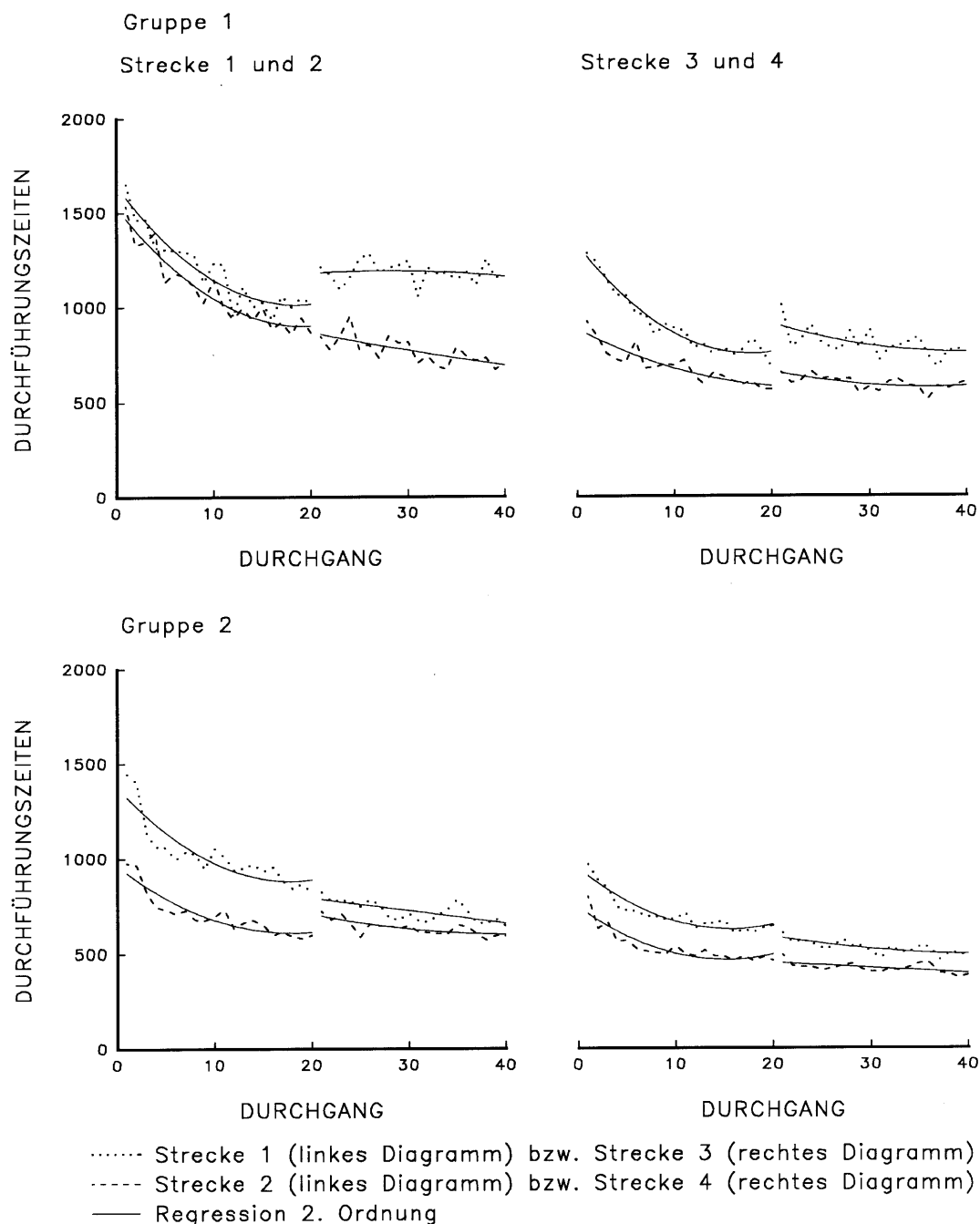


Abbildung 3.6: Mittelwerte der Durchführungszeiten der Strecken 1-4 beider Gruppen für Figur 2.

Der Vergleich der ersten Hand am Ende der Übungsblöcke ergab für keine Strecke einen signifikanten Unterschied (1T1R20 vs 2T1L20 $p=0.821$, 1T2R20 vs 2T2L20 $p=0.290$, 1T3R20 vs 2T3L20 $p=0.705$, 1T4R20 vs 2T4L20 $p=0.384$). Für die zweite Hand zeigten sich am Ende der Übungsblöcke in Strecke 1, 3 und 4 signifikant kürzere Durchführungszeiten der zweiten Gruppe (1T1L20 vs 2T1R20 $p=0.031$, 1T2L20 vs 2T2R20 $p=0.570$, 1T3L20 vs 2T3R20 $p=0.023$, 1T4L20 vs 2T4R20 $p=0.034$). Die Glättung bestätigte den Vorteil der zweiten Hand der zweiten Gruppe in Strecke 1 und 3 (1T1LE vs 2T1RE $p=0.034$, 1T2LE vs 2T2RE $p=0.650$, 1T3LE vs 2T3RE $p=0.049$, 1T4LE vs 2T4RE $p=0.070$).

Es ließen sich in der zweiten Gruppe in einzelnen Bewegungsabschnitten bessere Leistungen der rechten Hand zeigen.

Reihenfolgeeffekte

Beim Vergleich der jeweils linken Hand zeigte sich weder am Anfang noch am Ende des Übungsblocks ein signifikanter Unterschied (1T1L1 vs 2T1L1 $p=0.173$, 1T2L1 vs 2T2L1 $p=0.364$, 1T3L1 vs 2T3L1 $p=0.212$, 1T4L1 vs 2T4L1 $p=0.199$, 1T1L20 vs 2T1L20 $p=0.344$, 1T2L20 vs 2T2L20 $p=1.000$, 1T3L20 vs 2T3L20 $p=0.496$, 1T4L20 vs 2T4L20 $p=0.734$).

Ein zu vermutender Vorteil der linken Hand in der ersten Gruppe am Anfang des zweiten Übungsblocks (durch die vorhergehende Übung mit der rechten Hand) stellte sich also trotz vorhandenem Transfer nicht dar.

Der Vergleich der jeweils rechten Hand beider Gruppen brachte, wie zu erwarten, einen Vorteil der zweiten Gruppe am Anfang, jedoch nicht am Ende des Übungsblocks zutage (1T1R1 vs 2T1R1 $p=0.005$, 1T2R1 vs 2T2R1 $p=0.003$, 1T3R1 vs 2T3R1 $p=0.001$, 1T4R1 vs 2T4R1 $p=0.005$, 1T1R20 vs 2T1R20 $p=0.151$, 1T2R20 vs 2T2R20 $p=0.257$, 1T3R20 vs 2T3R20 $p=0.226$, 1T4R20 vs 2T4R20 $p=0.096$).

Dies erwies sich für den Anfang des Übungsblocks nach der Glättung als stabiler Unterschied. Der Vergleich der geglätteten Daten am Ende des Übungsblocks ergab ebenfalls signifikant kürzere Bewegungszeiten der Gruppe 2 für die Strecken 3 und 4 (1T1RE vs 2T1RE $p=0.112$, 1T2RE vs 2T2RE $p=0.112$, 1T3RE vs 2T3RE $p=0.049$, 1T4RE vs 2T4RE $p=0.034$).

Es zeigte sich also ein Vorteil der zweiten Gruppe hinsichtlich der Verkürzung der Bewegungszeiten im zweiten Übungsblock mit der rechten Hand. Daraus ergibt sich der Hinweis, daß die Reihenfolge der Verwendung der Hände in dieser Aufgabe von Bedeutung sein dürfte.

3.2.1.2 Durchführungszeiten in Figur 3

Im Vergleich der durchschnittlichen Bewegungszeiten am Anfang und Ende des Übungsblocks war die Verbesserung für die vier ausgewerteten Strecken mit der ersten Hand in Gruppe 1 (rechte Hand) signifikant für die Strecken 1 und 2 (1T1R1 vs 1T1R20 $p=0.028$, 1T2R1 vs 1T2R20 $p=0.059$, 1T3R1 vs 1T3R20 $p=0.241$, 1T4R1 vs 1T4R20 $p=0.114$).

Nach der Glättung ergab sich für die erste Hand in Gruppe 2 für Strecke eine signifikante Verbesserung (2T1LA vs 2T1LE $p=0.007$, 2T2LA vs 2T2LE $p=0.445$, 2T3LA vs 2T3LE $p=0.333$, 2T4LA vs 2T4LE $p=0.074$).

Nach dem Wechsel zur zweiten Hand zeigte sich in Gruppe 1 (linke Hand) keine signifikante Verbesserung mehr (1T1L1 vs 1T1L20 $p=0.203$, 1T2L1 vs 1T2L20 $p=0.359$, 1T3L1 vs 1T3L20 $p=0.185$, 1T4L1 vs 1T4L20 $p=0.203$).

In Gruppe 2 (rechte Hand) ergab sich ebenfalls nur für Strecke 1 eine signifikante Verbesserung (2T1R1 vs 2T1R20 $p=0.047$, 2T2R1 vs 2T2R20 $p=0.919$, 2T3R1 vs 2T3R20 $p=0.203$, 2T4R1 vs 2T4R20 $p=0.445$).

Im Gegensatz zu Gruppe 2 konnten für Gruppe 1 nur im ersten Übungsblock Verbesserungen nachgewiesen werden

Transfer 1

In Gruppe 1 zeigte sich nur für Strecke 1 und in Gruppe 2 nur für Strecke 2, daß die zweite Hand ein signifikant besseres Ausgangsniveau hatte (1T1R1 vs 1T1L1 $p=0.015$, 1T2R1 vs 1T2L1 $p=0.241$, 1T3R1 vs 1T3L1 $p=0.767$, 1T4R1 vs 1T4L1 $p=0.540$, 2T1L1 vs 2T1R1 $p=0.919$, 2T2L1 vs 2T2R1 $p=0.017$, 2T3L1 vs 2T3R1 $p=0.241$, 2T4L1 vs 2T4R1 $p=0.169$).

Nach der Glättung wurde eine Verbesserung der Gruppe 2 in Strecke 4 nachweisbar (2T1LA vs 2T1RA $p=0.959$, 2T2LA vs 2T2RA $p=0.059$, 2T3LA vs 2T3RA $p=0.114$, 2T4LA vs 2T4RA $p=0.047$).

Nach der nur mehr geringen Verkürzung der Bewegungszeiten im jeweils ersten Übungsblock konnten vorhandene Transfereffekte kaum mehr dargestellt werden.

Transfer 2

Die Werte in Gruppe 1 ergaben keinerlei signifikante Mittelwertsunterschiede (1T1R20 vs 1T1L1 $p=0.575$, 1T2R20 vs 1T2L1 $p=0.169$, 1T3R20 vs 1T3L1 $p=0.139$, 1T4R20 vs 1T4L1 $p=0.236$).

Anhand der geglätteten Werte ließ sich dies bestätigen, es ergab sich jedoch ein signifikanter Anstieg (Verschlechterung) der Durchführungszeiten in Strecke 4 (1T1RE vs 1T1LA $p=0.333$, 1T2RE vs 1T2LA $p=0.139$, 1T3RE vs 1T3LA $p=0.241$, 1T4RE vs 1T4LA $p=0.028$).

In Gruppe 2 zeigten sich ebenso keine signifikanten Unterschiede beim Übergang von der ersten auf die zweite Hand (2T1L20 vs 2T1R1 $p=0.093$, 2T2L20 vs 2T2R1 $p=0.114$, 2T3L20 vs 2T3R1 $p=0.799$, 2T4L20 vs 2T4R1 $p=0.221$).

Nach der Glättung war für die für Strecke 1 eine Verschlechterung nachzuweisen (2T1LE vs 2T1RA $p=0.009$, 2T2LE vs 2T2RA $p=0.139$, 2T3LE vs 2T3RA $p=0.074$, 2T4LE vs 2T4RA $p=0.074$).

Im Rahmen der insgesamt geringen Veränderungen der Bewegungszeiten im Übungsverlauf sind die geringen Unterschiede der Bewegungszeiten beim Übergang vom ersten auf den zweiten Übungsblock kaum zu bewerten.

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Im Vergleich der Gruppen untereinander am Anfang der Übungsblöcke ergab sich für die erste Hand kein signifikanter Unterschied (1T1R1 vs 2T1L1 $p=0.096$, 1T2R1 vs 2T2L1 $p=0.821$, 1T3R1 vs 2T3L1 $p=0.762$, 1T4R1 vs 2T4L1 $p=0.597$).

Für die zweite Hand zeigte sich am Anfang des Übungsblocks für Strecke 2 ein signifikanter Vorteil der zweiten Gruppe (1T1L1 vs 2T1R1 $p=0.940$, 1T2L1 vs 2T2R1 $p=0.031$, 1T3L1 vs 2T3R1 $p=0.112$, 1T4L1 vs 2T4R1 $p=0.069$).

Nach der Glättung der Daten wurde zusätzlich ein Vorteil der zweiten Gruppe für Strecke 4 sichtbar (1T1LA vs 2T1RA $p=0.940$, 1T2LA vs 2T2RA $p=0.034$, 1T3LA vs 2T3RA $p=0.096$, 1T4LA vs 2T4RA $p=0.023$).

Auch der Vergleich der ersten Hand der beiden Gruppen am Ende der Übungsblöcke ergab für keine der Strecken einen Mittelwertsunterschied (1T1R20 vs 2T1L20 $p=0.112$, 1T2R20 vs 2T2L20 $p=0.820$, 1T3R20 vs 2T3L20 $p=0.384$, 1T4R20 vs 2T4L20 $p=0.762$).

Für die zweite Hand fand sich am Ende des Übungsblocks ein signifikanter Vorteil der Gruppe 2 in Strecke 4 (1T1L20 vs 2T1R20 $p=0.427$, 1T2L20 vs 2T2R20 $p=0.257$, 1T3L20 vs 2T3R20 $p=0.131$, 1T4L20 vs 2T4R20 $p=0.016$).

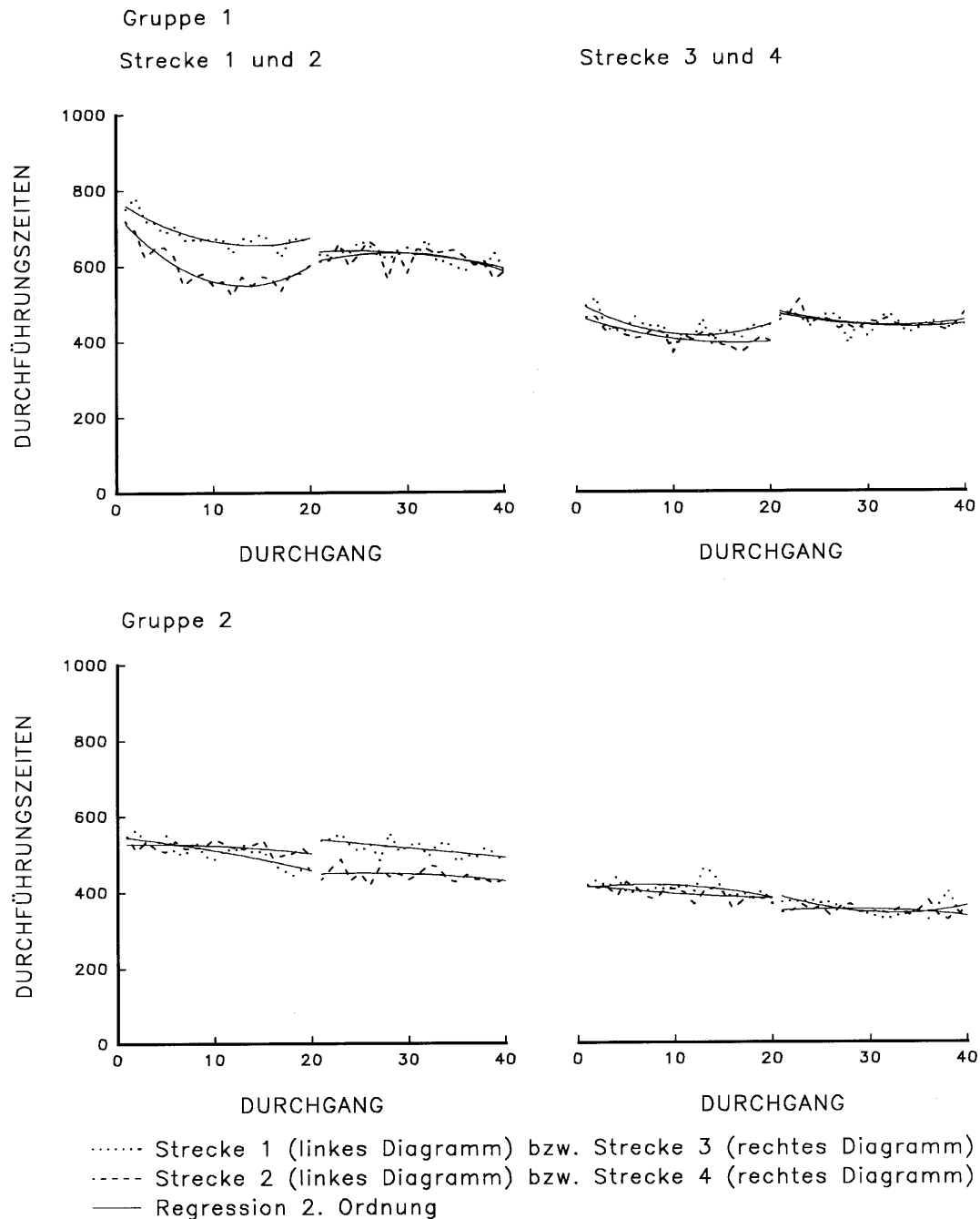


Abbildung 3.7 Mittelwerte der Durchführungszeiten der Strecken 1-4 beider Gruppen für Figur 3.

Reihenfolgeeffekte

Es zeigte sich im Vergleich der jeweils linken Hand weder am Anfang noch am Ende des Übungsblocks ein signifikanter Unterschied (1T1L1 vs 2T1L1 $p=0.545$, 1T2L1 vs 2T2L1 $p=0.762$, 1T3L1 vs 2T3L1 $p=0.570$, 1T4L1 vs 2T4L1 $p=0.821$, 1T1L20 vs 2T1L20 $p=0.406$, 1T2L20 vs 2T2L20 $p=0.762$, 1T3L20 vs 2T3L20 $p=0.307$, 1T4L20 vs 2T4L20 $p=0.212$).

Der Vergleich der rechten Hand beider Gruppen am Anfang des Übungsblocks brachte aufgrund deutlich kürzer Durchführungszeiten der zweiten Gruppe einen signifikanten Unterschied in Strecke 2 (1T1R1 vs 2T1R1 $p=0.121$, 1T2R1 vs 2T2R1 $p=0.021$, 1T3R1 vs 2T3R1 $p=0.162$, 1T4R1 vs 2T4R1 $p=0.070$, 1T1R20 vs 2T1R20 $p=0.186$, 1T2R20 vs 2T2R20 $p=0.225$, 1T3R20 vs 2T3R20 $p=0.199$, 1T4R20 vs 2T4R20 $p=0.325$).

Zusammenfassend läßt sich über den Vergleich der Durchführungszeiten in beiden Gruppen sagen, daß, sofern überhaupt Unterschiede bestanden, ein Vorteil der rechten Hand in Gruppe 2, also als zweite Hand nach vorangehender Übung mit der linken Hand, festzustellen war.

3.2.2.1 Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 2

Im Vergleich der durchschnittlichen Anzahl an Geschwindigkeitswechsel am Anfang und Ende des Übungsblocks war die Verbesserung für die vier ausgewerteten Strecken mit der ersten Hand für beide Gruppen signifikant (1P1R1 vs 1P1R20 $p=0.012$, 1P2R1 vs 1P2R20 $p=0.011$, 1P3R1 vs 1P3R20 $p=0.005$, 1P4R1 vs 1P4R20 $p=0.008$, 2P1L1 vs 2P1L20 $p=0.005$, 2P2L1 vs 2P2L20 $p=0.019$, 2P3L1 vs 2P3L20 $p=0.005$, 2P4L1 vs 2P4L20 $p=0.005$).

Nach dem Wechsel zur anderen Hand zeigte sich in beiden Gruppen nur mehr für Strecke 2 eine signifikante Verbesserung (1P1L1 vs 1P1L20 $p=0.308$, 1P2L1 vs 1P2L20 $p=0.024$, 1P3L1 vs 1P3L20 $p=0.888$, 1P4L1 vs 1P4L20 $p=0.108$, 2P1R1 vs 2P1R20 $p=0.074$, 2P2R1 vs 2P2R20 $p=0.021$, 2P3R1 vs 2P3R20 $p=0.092$, 2P4R1 vs 2P4R20 $p=0.072$). Wie in Abbildung 3.8 zu erkennen ist, war die Leistung in der langen Strecke (Strecke 1) in Gruppe 1 zudem deutlich schlechter. Nach der Glättung erweiterte sich die signifikante Verbesserung der zweiten Gruppe auf die Strecken 1 und 2 (2P1RA vs 2P1RE $p=0.050$, 2P2RA vs 2P2RE $p=0.005$, 2P3RA vs 2P3RE $p=0.169$, 2P4RA vs 2P4RE $p=0.208$).

Nachdem beide Gruppen mit der ersten Hand eine klare Abnahme der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel erzielten, zeigten sich für die jeweils zweite Hand nur mehr geringfügige Verbesserungen. Zudem fällt, wie bei den Durchführungszeiten, die deutlich schlechtere Leistung der ersten Gruppe nach dem Handwechsel in Strecke 1 auf (Abb. 3.6).

Transfer 1

In Gruppe 1 zeigte sich für alle 4 Strecken klar, daß die zweite Hand ein signifikant besseres Ausgangsniveau hatte (1P1R1 vs 1P1L1 $p=0.021$, 1P2R1 vs 1P2L1 $p=0.012$, 1P3R1 vs 1P3L1 $p=0.005$, 1P4R1 vs 1P4L1 $p=0.021$).

Auch in Gruppe 2 verfehlte nur Strecke 2 primär die Signifikanz (2P1L1 vs 2P1R1 $p=0.005$, 2P2L1 vs 2P2R1 $p=0.109$, 2P3L1 vs 2P3R1 $p=0.005$, 2P4L1 vs 2P4R1 $p=0.008$).

Nach Glättung der Daten wurde jedoch für alle Strecken eine signifikante Abnahme der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel erreicht, so daß man von einem positiven Transfer ausgehen kann (2P1LA vs 2P1RA $p=0.005$, 2P2LA vs 2P2RA $p=0.007$, 2P3LA vs 2P3RA $p=0.005$, 2P4LA vs 2P4RA $p=0.005$).

Transfer 2

Die Werte ergaben für beide Gruppen keine signifikanten Mittelwertsunterschiede, was auf einen positiven Transfer hinweist (1P1R20 vs 1P1L1 $p=0.102$, 1P2R20 vs 1P2L1 $p=0.398$, 1P3R20 vs 1P3L1 $p=0.765$, 1P4R20 vs 1P4L1 $p=0.272$, 2P1L20 vs 2P1R1 $p=0.313$, 2P2L20 vs 2P2R1 $p=0.052$, 2P3L20 vs 2P3R1 $p=0.196$, 2P4L20 vs 2P4R1 $p=0.136$).

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Im Vergleich der Gruppen untereinander am Anfang der Übungsblöcke ergab sich, für keine der beiden Hand ein signifikanter Unterschied (1P1R1 vs 2P1L1 $p=0.405$, 1P2R1 vs 2P2L1 $p=0.162$, 1P3R1 vs 2P3L1 $p=0.271$, 1P4R1 vs 2P4L1 $p=0.472$, 1P1L1 vs 2P1R1 $p=0.058$, 1P2L1 vs 2P2R1 $p=0.879$, 1P3L1 vs 2P3R1 $p=0.909$, 1P4L1 vs 2P4R1 $p=0.233$).

Die Glättung ergab nur einen Vorteil der zweiten Gruppe in Strecke 4 mit der rechten Hand (1P1RA vs 2P1LA $p=0.650$, 1P2RA vs 2P2LA $p=0.198$, 1P3RA vs

2P3LA $p=0.059$, 1P4RA vs 2P4LA $p=0.272$, 1P1LA vs 2P1RA $p=0.160$, 1P2LA vs 2P2RA $p=0.970$, 1P3LA vs 2P3RA $p=0.186$, 1P4LA vs 2P4RA $p=0.049$).

Auch der Vergleich der jeweils ersten und zweiten Hand der beiden Gruppen am Ende der Übungsblöcke zeigte für keine der Strecken einen Unterschied (1P1R20 vs 2P1L20 $p=0.272$, 1P2R20 vs 2P2L20 $p=0.270$, 1P3R20 vs 2P3L20 $p=0.492$, 1P4R20 vs 2P4L20 $p=0.144$, 1P1L20 vs 2P1R20 $p=0.052$, 1P2L20 vs 2P2R20 $p=0.732$, 1P3L20 vs 2P3R20 $p=0.170$, 1P4L20 vs 2P4R20 $p=0.665$).

Die Glättung zeigte einen signifikanten Vorteil der Gruppe 2 in Strecke 1 (1P1LE vs 2P1RE $p=0.021$, 1P2LE vs 2P2RE $p=0.449$, 1P3LE vs 2P3RE $p=0.069$, 1P4LE vs 2P4RE $p=0.196$).

Reihenfolgeeffekte

Es zeigte sich im Vergleich der jeweils linken Hand am Anfang ein signifikanter Vorteil in Strecke 3 für die zweite Gruppe und nicht wie zu erwarten für Gruppe 1 (1P1L1 vs 2P1L1 $p=0.256$, 1P2L1 vs 2P2L1 $p=0.404$, 1P3L1 vs 2P3L1 $p=0.015$, 1P4L1 vs 2P4L1 $p=0.103$).

In den geglätteten Daten ergab sich dagegen keinerlei Unterschied der beiden Gruppen (1P1LA vs 2P1LA $p=0.273$, 1P2LA vs 2P2LA $p=0.256$, 1P3LA vs 2P3LA $p=0.162$, 1P4LA vs 2P4LA $p=0.140$).

Am Ende des Übungsblocks der jeweils linken Hand zeigte sich kein signifikanter Unterschied (1P1L20 vs 2P1L20 $p=0.224$, 1P2L20 vs 2P2L20 $p=0.939$, 1P3L20 vs 2P3L20 $p=0.543$, 1P4L20 vs 2P4L20 $p=0.669$).

Der Vergleich der rechten Hand beider Gruppen brachte den erwarteten Vorteil der zweiten Gruppe am Anfang des Übungsblocks in allen Strecken zutage (1P1R1 vs 2P1R1 $p=0.003$, 1P2R1 vs 2P2R1 $p=0.008$, 1P3R1 vs 2P3R1 $p=0.001$, 1P4R1 vs 2P4R1 $p=0.006$).

Der Vergleich der rechten Hand am Ende des Übungsblocks zeigte zuerst keinen Unterschied zwischen den Gruppen (1P1R20 vs 2P1R20 $p=0.149$, 1P2R20 vs 2P2R20 $p=0.160$, 1P3R20 vs 2P3R20 $p=0.110$, 1P4R20 vs 2P4R20 $p=0.111$).

Nach der Glättung ergab sich jedoch für Strecke 1 und 4 ein signifikanter Mittelwertsunterschied, der von einem Vorteil der rechten Hand in Gruppe 2 herrührte (1P1RE vs 2P1RE $p=0.028$, 1P2RE vs 2P2RE $p=0.185$, 1P3RE vs 2P3RE $p=0.088$, 1P4RE vs 2P4RE $p=0.023$).

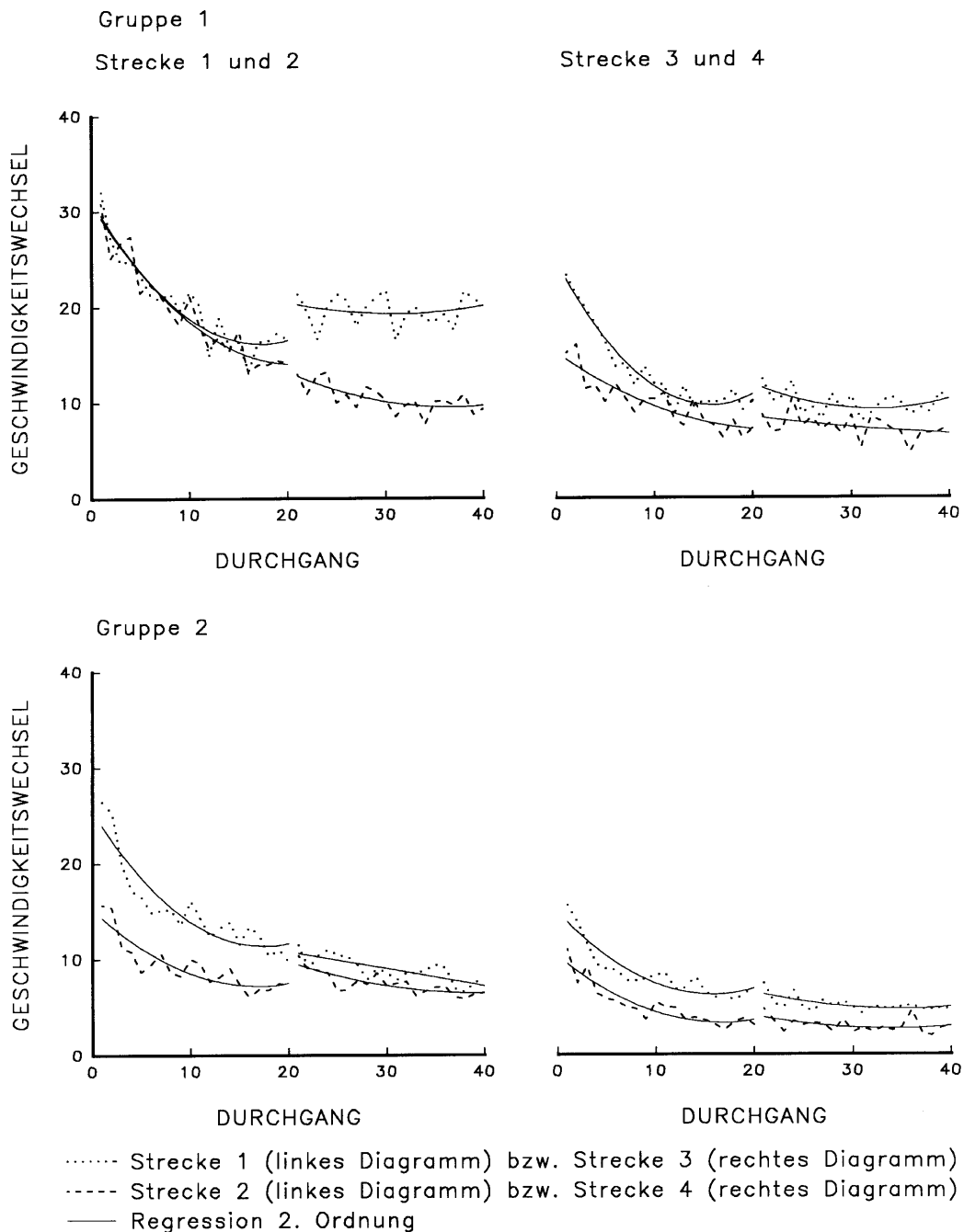


Abbildung 3.8: Mittelwerte der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel für die Strecken 1-4 beider Gruppen für Figur 2.

Nachdem bei der ersten Hand also kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen bestand, ergaben sich Hinweise für Vorteile der zweiten Gruppe mit der rechten bzw. zweiten Hand. Obwohl Transfereffekte nachweisbar waren, stellte sich der zu vermutende Vorteil der linken Hand der ersten Gruppe 1 im zweiten Übungsblock nicht ein. Daraus lässt sich ebenfalls sowohl indirekt als auch

direkt auf eine schlechtere Leistung der ersten Gruppe bezüglich der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 2 schließen.

3.2.2.2 Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 3

Im Vergleich der durchschnittlichen Anzahl der Geschwindigkeitswechsel am Anfang und Ende des Übungsblocks war für Gruppe 1 die Verbesserung mit der ersten Hand signifikant für die Strecken 1 und 2 (1P1R1 vs 1P1R20 $p=0.012$, 1P2R1 vs 1P2R20 $p=0.035$, 1P3R1 vs 1P3R20 $p=0.102$, 1P4R1 vs 1P4R20 $p=0.339$). Nach der Glättung zeigte sich eine signifikante Abnahme der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel dagegen für Strecke 1 und 3 (1P1RA vs 1P1E $p=0.021$, 1P2RA vs 1P2RE $p=0.074$, 1P3RA vs 1P3RE $p=0.028$, 1P4RA vs 1P4RE $p=0.374$).

In Gruppe 2 ergab sich mit der ersten Hand keine signifikante Abnahme der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (2P1L1 vs 2P1L20 $p=0.103$, 2P2L1 vs 2P2L20 $p=0.352$, 2P3L1 vs 2P3L20 $p=0.357$, 2P4L1 vs 2P4L20 $p=0.093$).

Nach der Glättung zeigte sich für Strecke 1 eine signifikante Abnahme der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (2P1LA vs 2P1LE $p=0.024$, 2P2LA vs 2P2LE $p=0.185$, 2P3LA vs 2P3LE $p=0.085$, 2P4LA vs 2P4LE $p=0.106$).

Nach dem Wechsel zur rechten Hand zeigte sich für keine der Gruppen eine signifikante Verbesserung mehr (1P1L1 vs 1P1L20 $p=0.595$, 1P2L1 vs 1P2L20 $p=0.812$, 1P3L1 vs 1P3L20 $p=0.730$, 1P4L1 vs 1P4L20 $p=0.190$, 2P1R1 vs 2P1R20 $p=0.513$, 2P2R1 vs 2P2R20 $p=0.057$, 2P3R1 vs 2P3R20 $p=0.739$, 2P4R1 vs 2P4R20 $p=0.070$).

Für beide Gruppen ließ sich im ersten Übungsblock nur an einzelnen Strecken eine signifikante Abnahme der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel nachweisen, die im zweiten Übungsblock nicht mehr zu belegen war.

Transfer 1

In Gruppe 1 zeigte sich für Strecke 1, daß die zweite Hand ein signifikant besseres Ausgangsniveau hatte (1P1R1 vs 1P1L1 $p=0.008$, 1P2R1 vs 1P2L1 $p=0.096$, 1P3R1 vs 1P3L1 $p=0.062$, 1P4R1 vs 1P4L1 $p=1.000$).

Nach der Glättung der Daten ergab sich eine Signifikanz für die Strecken 1 und 3 (1P1RA vs 1P1LA $p=0.005$, 1P2RA vs 1P2LA $p=0.123$, 1P3RA vs 1P3LA $p=0.047$, 1P4RA vs 1P4LA $p=0.594$).

In Gruppe 2 zeigte sich für keine der Strecken ein signifikanter Vorteil der zweiten Hand (2P1L1 vs 2P1R1 $p=0.633$, 2P2L1 vs 2P2R1 $p=0.171$, 2P3L1 vs 2P3R1 $p=0.159$, 2P4L1 vs 2P4R1 $p=0.490$).

Nach der Glättung der Werte wurde dagegen in Strecke 3 eine signifikante Verbesserung sichtbar (2P1LA vs 2P1RA $p=0.359$, 2P2LA vs 2P2RA $p=0.202$, 2P3LA vs 2P3RA $p=0.021$, 2P4LA vs 2P4RA $p=0.406$).

Transfer 2

Bei diesem Vergleich ergaben die Werte in Gruppe 1 durch eine Abnahme der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel nur für Strecke 1 einen signifikanten Mittelwertsunterschied der verglichenen Punkte (1P1R20 vs 1P1L1 $p=0.011$, 1P2R20 vs 1P2L1 $p=0.394$, 1P3R20 vs 1P3L1 $p=0.890$, 1P4R20 vs 1P4L1 $p=0.684$). Das bedeutet, daß sich die Bewegungszeiten am Übergang der rechten zur linken Hand (neben der Verbesserung in Strecke 1) kaum unterscheiden.

In Gruppe 2 zeigte sich ebenso keine signifikanten Mittelwertsunterschiede der Werte (2P1L20 vs 2P1R1 $p=0.258$, 2P2L20 vs 2P2R1 $p=0.671$, 2P3L20 vs 2P3R1 $p=0.194$, 2P4L20 vs 2P4R1 $p=0.306$).

In Gruppe 1 ließen sich vereinzelt Transfereffekte nachweisen. In Gruppe 2 ist aufgrund der hohen Ähnlichkeit der Werte am Übergang (Handwechsel) und der allgemein geringen Veränderungen der Werte im Übungsverlauf nur von geringen Transfereffekten auszugehen (Abb. 3.9).

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Es zeigten sich am Anfang der Übungsblöcke weder für die erste noch für die zweite Hand signifikante Mittelwertsunterschiede (1P1R1 vs 2P1L1 $p=0.194$, 1P2R1 vs 2P2L1 $p=0.731$, 1P3R1 vs 2P3L1 $p=0.514$, 1P4R1 vs 2P4L1 $p=0.700$, 1P1L1 vs 2P1R1 $p=0.702$, 1P2L1 vs 2P2R1 $p=0.438$, 1P3L1 vs 2P3R1 $p=0.530$, 1P4L1 vs 2P4R1 $p=0.936$).

Auch der Vergleich der ersten Hand der beiden Gruppen am Ende der Übungsblöcke ergab keinen Gruppenunterschied (1P1R20 vs 2P1L20 $p=0.125$, 1P2R20 vs 2P2L20 $p=0.969$, 1P3R20 vs 2P3L20 $p=0.969$, 1P4R20 vs 2P4L20 $p=0.549$).

Für die zweite Hand fand sich für Strecke 4 ein signifikanter Vorteil für Gruppe 2 (1P1L20 vs 2P1R20 $p=0.441$, 1P2L20 vs 2P2R20 $p=0.110$, 1P3L20 vs 2P3R20 $p=0.253$, 1P4L20 vs 2P4R20 $p=0.007$).

Reihenfolgeeffekte

Im Vergleich der linken Hand am Anfang des Übungsblocks zeigte sich kein signifikanter Unterschied (1P1L1 vs 2P1L1 $p=0.340$, 1P2L1 vs 2P2L1 $p=0.879$, 1P3L1 vs 2P3L1 $p=0.757$, 1P4L1 vs 2P4L1 $p=0.638$).

Am Ende des Übungsblocks fand sich ein Vorteil in Strecke 4 zugunsten der Gruppe 2 (1P1L20 vs 2P1L20 $p=0.299$, 1P2L20 vs 2P2L20 $p=0.846$, 1P3L20 vs 2P3L20 $p=0.757$, 1P4L20 vs 2P4L20 $p=0.003$).

Nach der Glättung zeigte sich keine signifikanter Vorteil einer Gruppe (1P1LA vs 2P1LA $p=0.623$, 1P2LA vs 2P2LA $p=0.677$, 1P3LA vs 2P3LA $p=0.569$, 1P4LA vs 2P4LA $p=0.383$, 1P1LE vs 2P1LE $p=0.184$, 1P2LE vs 2P2LE $p=0.703$, 1P3LE vs 2P3LE $p=0.541$, 1P4LE vs 2P4LE $p=0.100$).

Der Vergleich der rechten Hand beider Gruppen zeigte am Anfang der Übungsblöcke keine signifikanten Unterschiede (1P1R1 vs 2P1R1 $p=0.062$, 1P2R1 vs 2P2R1 $p=0.053$, 1P3R1 vs 2P3R1 $p=0.150$, 1P4R1 vs 2P4R1 $p=0.275$).

Durch die Glättung ergab sich ein Vorteil der zweiten Gruppe in Strecke 3 (1P1RA vs 2P1RA $p=0.081$, 1P2RA vs 2P2RA $p=0.198$, 1P3RA vs 2P3RA $p=0.049$, 1P4RA vs 2P4RA $p=0.238$).

Am Ende der Übungsblöcke zeigte derselbe Vergleich keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen (1P1R20 vs 2P1R20 $p=0.264$, 1P2R20 vs 2P2R20 $p=0.293$, 1P3R20 vs 2P3R20 $p=0.305$, 1P4R20 vs 2P4R20 $p=0.113$).

Sofern überhaupt Unterschiede bestanden waren diese in Gruppe 2 zumeist für die zweite (rechten) Hand nachzuweisen, obwohl zuvor kaum Transfereffekte darzustellen waren.

3.2.3.1 Konstante Figurzeit in Figur 2

Um angehende Effekte zeitlicher Invarianz darzustellen, wurden die jeweiligen Strecken mittels eines Quotienten der Bewegungszeiten miteinander verglichen.

Wie in Experiment 1 unterlagen die Quotienten ausgeprägten Schwankungen.

Hinsichtlich der Quotienten zeigte sich im Vergleich der durchschnittlichen Werte am Anfang und Ende des Übungsblocks mit der ersten Hand für Gruppe 1 keine

signifikante Veränderung (1Q2R1 vs 1Q2R20 $p=0.508$, 1Q1R1 vs 1Q1R20 $p=0.203$).

Mit der zweiten Hand erreichte Gruppe 1 ebenfalls keine signifikante Verbesserung (1Q2L1 vs 1Q2L20 $p=0.241$, 1Q1L1 vs 1Q1L20 $p=0.333$). Durch die Glättung zeigte sich jedoch eine signifikante Abnahme des Quotienten 2 (1Q1LA vs 1Q1LE $p=0.575$, 1Q2LA vs 1Q2LE $p=0.028$).

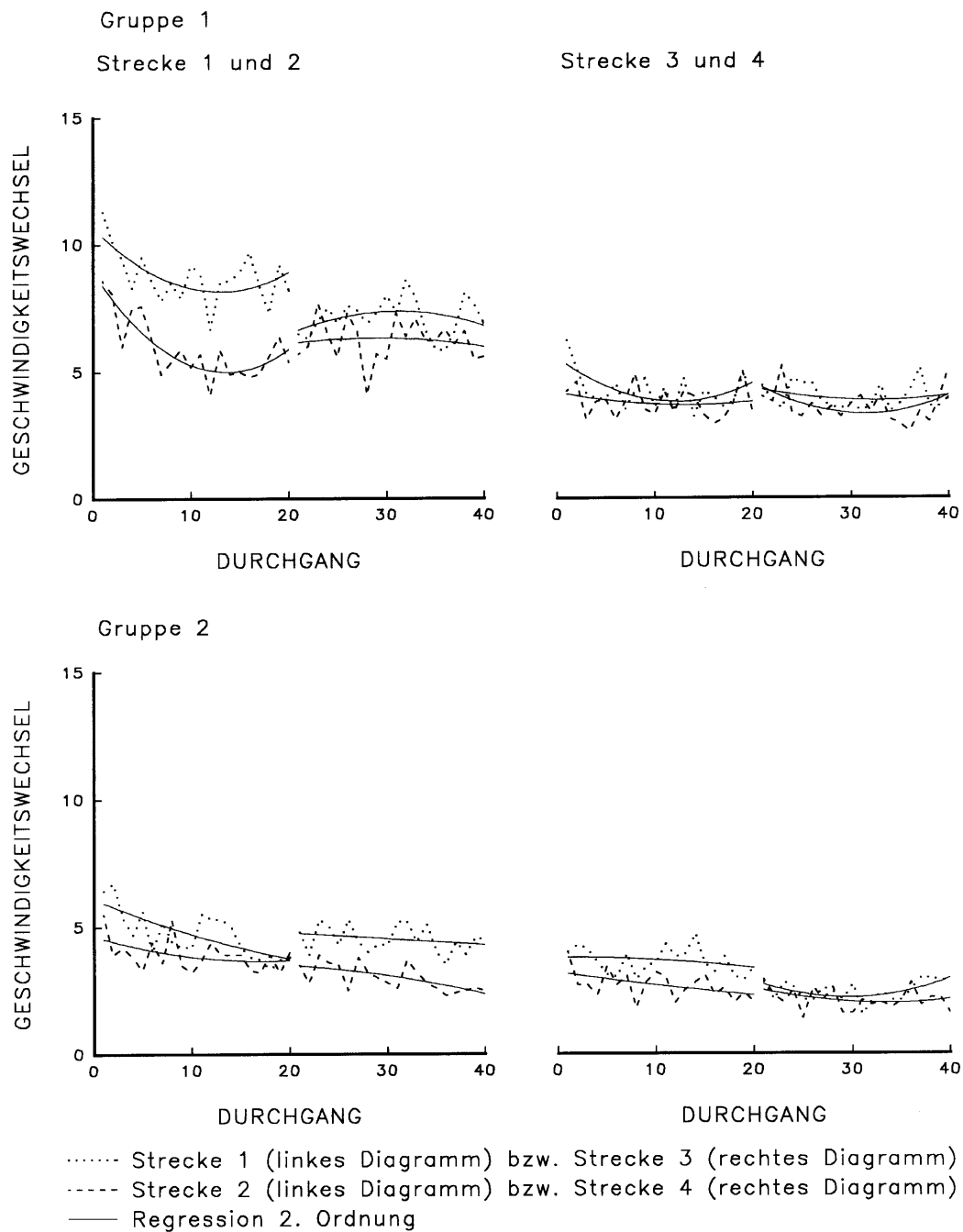


Abbildung 3.9: Mittelwerte der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel der Stecken 1-4 beider Gruppen für Figur 3.

Gruppe 2 erzielte eine signifikante Abnahme des Quotienten 1 mit der linken (ersten) Hand (2Q2L1 vs 2Q2L20 $p=0.203$, 2Q1L1 vs 2Q1L20 $p=0.017$). Nach der Glättung der Werte zeigte sich eine signifikante Verbesserung des Quotienten 2 (2Q2LA vs 2Q2LE $p=0.013$, 2Q1LA vs 2Q1LE $p=0.093$).

Für die zweite Hand war in Gruppe 2 keine weitere Verbesserung mehr zu erkennen (2Q2R1 vs 2Q2R20 $p=0.959$, 2Q1R1 vs 2Q1R20 $p=0.878$).

Insgesamt ließ sich nahezu keine signifikante Abnahme des Quotienten nachweisen.

Im Vergleich der Werte am Anfang des ersten Übungsblocks mit denen am Ende des zweiten Übungsblocks zeigte sich für Gruppe 1 nur für Quotient 2 eine signifikante Verbesserung (1Q2R1 vs 1Q2L20 $p=0.047$, 1Q1R1 vs 1Q1L20 $p=0.139$).

Nach der Glättung wurde die in der Abbildung 3.10 erkennbare Verschlechterung jedoch für Quotient 1 signifikant (1Q1RA vs 1Q1LE $p=0.022$).

Für die zweite Gruppe ergab sich zwar auch für den Quotienten 2 eine signifikante Verschlechterung, war nach der Glättung jedoch nicht mehr signifikant (2Q2L1 vs 2Q2R20 $p=0.013$, 2Q1L1 vs 2Q1R20 $p=0.139$, 2Q2LA vs 2Q2RE $p=0.959$, 2Q1LA vs 2Q1RE $p=0.139$).

Eine Abnahme des Quotienten ließ sich also eher für die kürzeren Strecken nachweisen. Die Zunahme des Quotienten 1 in Gruppe 1 mit beiden Händen legt nahe, daß eine günstige zeitliche Organisation in den räumlich anspruchsvolleren Strecken weder von der rechten Hand alleine noch von der linken Hand durch die Reihenfolge rechts - links etabliert werden konnte.

Transfer 1

Für Gruppe 1 war primär kein Hinweis für positive Transfereffekte zu finden (1Q2R1 vs 1Q2L1 $p=0.241$, 1Q1R1 vs 1Q1L1 $p=0.445$). Nach der Glättung zeigte sich jedoch eine signifikante Verbesserung des Quotienten 2 (1Q2RA vs 1Q2LA $p=0.013$, 1Q1RA vs 1Q1LA $p=0.114$).

Für Gruppe 2 ergab sich bezüglich des Quotienten im zweiten Übungsblock kein signifikanter Unterschied (2Q2L1 vs 2Q2R1 $p=0.074$, 2Q1L1 vs 2Q1R1 $p=0.333$).

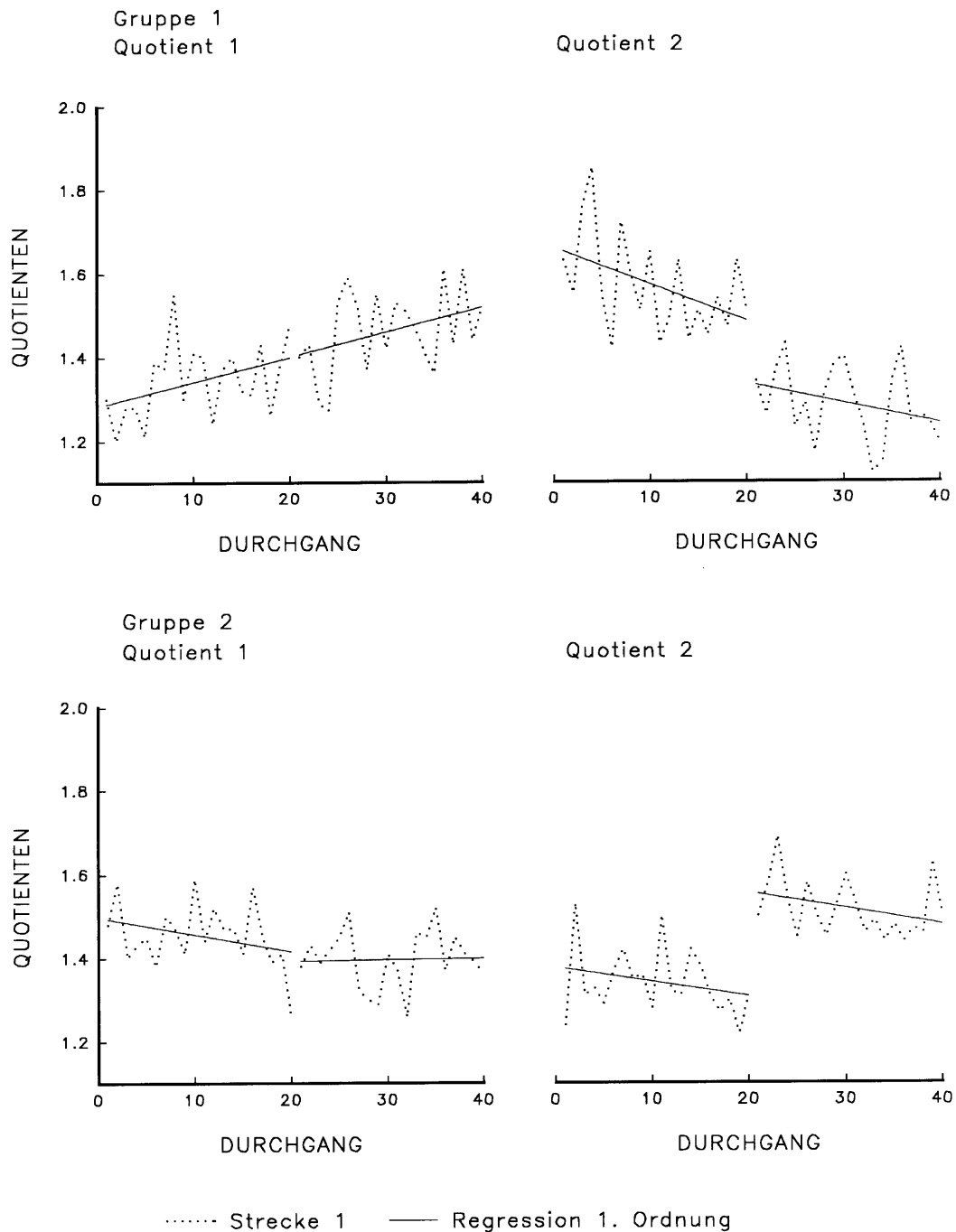


Abbildung 3.10: Mittelwerte beider Quotienten der Durchführungszeiten beider Gruppen für Figur 2.

Transfer 2

Für keine der beiden Gruppen zeigten sich signifikante Unterschiede (1Q2R20 vs 1Q2L1 $p=0.285$, 1Q1R20 vs 1Q1L1 $p=0.646$, 2Q2L20 vs 2Q2R1 $p=0.114$, 2Q1L20 vs 2Q1R1 $p=0.386$).

Nach Glättung dieser Werte zeigten sich jedoch für beide Gruppen signifikante

Unterschiede der Quotienten 2 (1Q2RE1Q2LA $p=0.028$, 1Q1RE1Q1LA $p=0.575$, 2Q2LE2Q2RA $p=0.005$, 2Q1LE2Q1RA $p=0.333$). Im ersteren Fall (Gruppe 1) gründet dieser auf einer Abnahme des Quotienten, also einer Verbesserung, in Gruppe 2 entstand der Unterschied durch eine Verschlechterung beim Handwechsel.

Insgesamt waren also nur für den Quotienten der kurzen Strecken für Gruppe 1 Transfereffekte nachzuweisen.

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Der Vergleich der jeweils ersten bzw. zweiten Hand zwischen den Gruppen am Anfang der Übungsblöcke ergab keinen signifikanten Unterschied (1Q2R1 vs 2Q2L1 $p=0.650$, 1Q1R1 vs 2Q1L1 $p=0.597$, 1Q2L1 vs 2Q2R1 $p=0.705$, 1Q1L1 vs 2Q1R1 $p=0.326$).

Auch am Ende der Übungsblöcke zeigte der Vergleich der ersten bzw. zweiten Hand keinen Gruppenunterschied (1Q2R20 vs 2Q2L20 $p=0.940$, 1Q1R20 vs 2Q1L20 $p=0.364$, 1Q2L20 vs 2Q2R20 $p=0.364$, 1Q1L20 vs 2Q1R20 $p=0.096$).

Reihenfolgeeffekte

Es zeigte sich für keine der beiden Hände am Ende des Versuchsblocks ein signifikanter Unterschied (1Q2L1 vs 2Q2L1 $p=0.705$, 1Q1L1 vs 2Q1L1 $p=0.326$, 1Q2L20 vs 2Q2L20 $p=0.364$, 1Q1L20 vs 2Q1L20 $p=0.096$, 1Q2R1 vs 2Q2R1 $p=0.650$, 1Q2R20 vs 2Q2R20 $p=0.940$, 1Q1R1 vs 2Q1R1 $p=0.597$, 1Q1R20 vs 2Q1R20 $p=0.364$). Bei insgesamt nur geringen Veränderungen im Übungsverlauf konnten auch zwischen den Gruppen kaum Unterschiede nachgewiesen werden.

3.2.3.2 Konstante Figurzeit in Figur 3

Für beide Gruppen ließ sich im Vergleich der durchschnittlichen Quotienten am Anfang und Ende des Übungsblocks weder mit der ersten noch mit der zweiten Hand eine signifikante Abnahme des Quotienten nachweisen (1Q2R1 vs 1Q2R20 $p=0.959$, 1Q1R1 vs 1Q1R20 $p=0.575$, 2Q2L1 vs 2Q2L20 $p=0.508$, 2Q1L1 vs 2Q1L20 $p=0.721$, 2Q2R1 vs 2Q2R20 $p=0.508$, 2Q1R1 vs 2Q1R20 $p=0.203$, 1Q2L1 vs 1Q2L20 $p=0.114$, 1Q1L1 vs 1Q1L20 $p=0.799$).

Im Vergleich der Werte am Anfang des ersten Übungsblocks mit denen am Ende des zweiten Übungsblocks zeigte sich jedoch für Gruppe 1 eine signifikante Abnahme beider Quotienten, die sich für die zweite Gruppe nicht nachweisen ließ (1Q2R1 vs 1Q2L20 $p=0.028$, 1Q1R1 vs 1Q1L20 $p=0.047$, 2Q2L1 vs 2Q2R20 $p=0.721$, 2Q1L1 vs 2Q1R20 $p=0.799$).

In Gruppe 1 ließ sich also, im Gegensatz zur zweiten Gruppe, eine Verbesserung der Quotienten über den Verlauf beider Übungsblöcke feststellen.

Transfer 1

Beim Vergleich der Quotienten am Anfang des Übungsblocks der ersten Hand mit denen der zweiten Hand ergaben sich in beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede (1Q2R1 vs 1Q2L1 $p=0.285$, 1Q1R1 vs 1Q1L1 $p=0.169$, 2Q2L1 vs 2Q2R1 $p=0.445$, 2Q1L1 vs 2Q1R1 $p=0.241$). Der selbe Vergleich zeigte für Gruppe 1 nach der Glättung jedoch signifikant niedrigere Quotienten am Anfang des jeweils zweiten Übungsblocks und eine signifikante Verschlechterung des Quotienten 1 in Gruppe 2 (1Q2RA vs 1Q2LA $p=0.013$, 1Q1RA vs 1Q1LA $p=0.009$, 2Q2LA vs 2Q2RA $p=0.959$, 2Q1LA vs 2Q1RA $p=0.037$).

Transfer 2

Hierbei zeigte sich für beide Gruppen kein signifikanter Unterschied (1Q2R20 vs 1Q2L1 $p=0.114$, 1Q1R20 vs 1Q1L1 $p=0.139$, 2Q2L20 vs 2Q2R1 $p=0.799$, 2Q1L20 vs 2Q1R1 $p=0.169$).

Nach Glättung der Werte zeigte sich eine signifikante Abnahme des Quotienten 2 in Gruppe 1 beim Wechsel von der rechten zur linken Hand, sowie eine signifikante Verschlechterung (Zunahme) des Quotienten 1 für Gruppe 2 (1Q2RE vs 1Q2LA $p=0.017$, 2Q1LE vs 2Q1RA $p=0.017$).

Positive Transfereffekte ließen sich ausschließlich in Gruppe 1 nachweisen.

Gruppenvergleich

Vorbestehende Lateralisierung

Der Vergleich zwischen den Gruppen am Anfang der Übungsblöcke ergab weder für die erste Hand noch für die zweite Hand einen signifikanten Unterschied (1P2R1 vs 2P2L1 $p=0.174$, 1P1R1 vs 2P1L1 $p=0.880$, 1P2L1 vs 2P2R1 $p=0.705$, 1P1L1 vs 2P1R1 $p=1.000$).

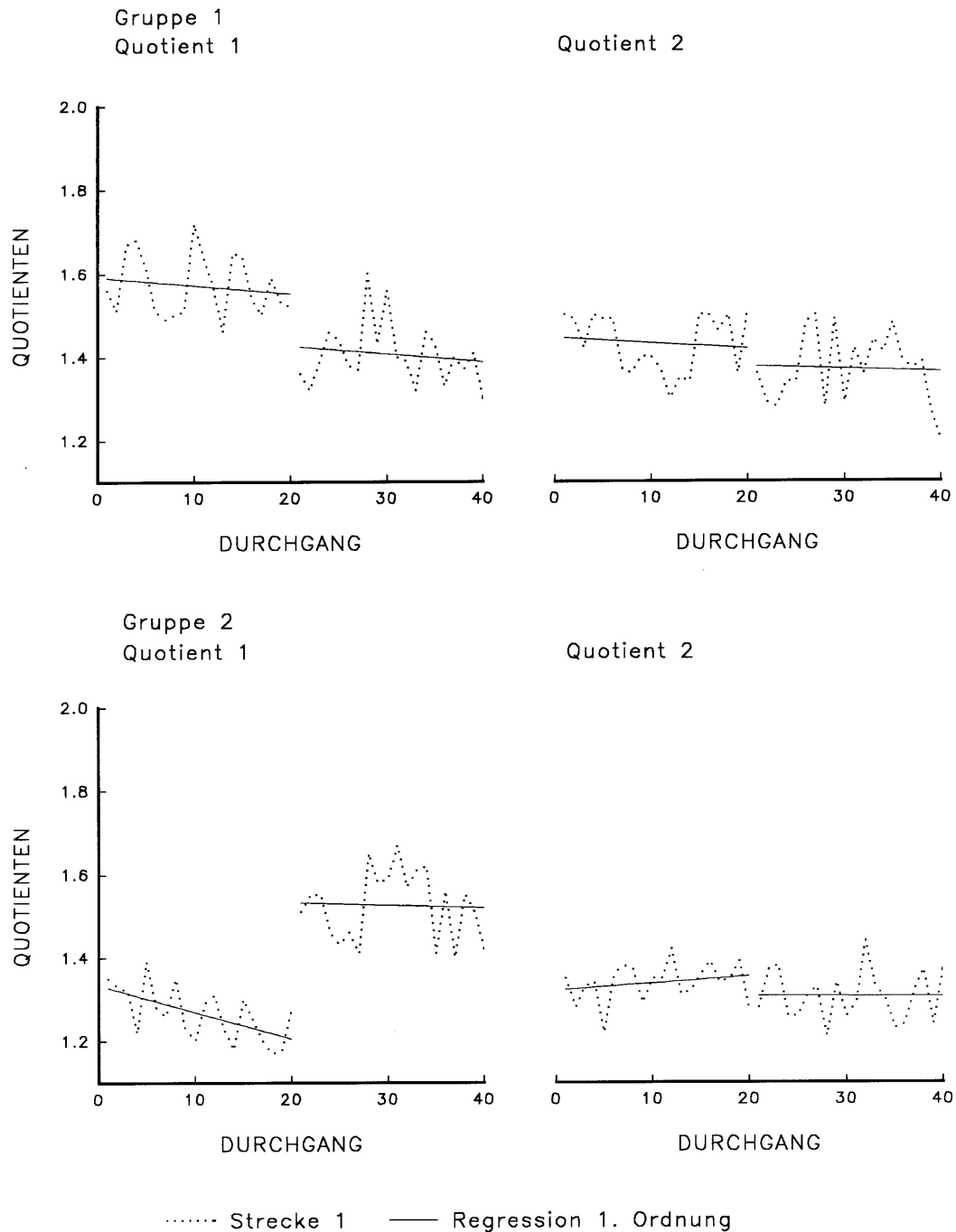


Abbildung 3.11: Mittelwerte beider Quotienten der Durchführungszeiten beider Gruppen für Figur 3.

Auch der Vergleich am Ende der Übungsblöcke ergab weder für die erste noch für die zweite Hand einen signifikanten Unterschied (1Q2R20 vs 2Q2L20 $p=0.290$, 1Q1R20 vs 2Q1L20 $p=0.496$, 1Q2L20 vs 2Q2R20 $p=0.545$, 1Q1L20 vs 2Q1R20 $p=0.545$).

Reihenfolgeeffekte

Es zeigte sich im Vergleich der Quotienten für keine der Hände weder am Anfang noch am Ende des Übungsblocks ein signifikanter Unterschied (1Q2R1 vs 2Q2R1 $p=0.174$, 1Q2R20 vs 2Q2R20 $p=0.290$, 1Q1R1 vs 2Q1R1 $p=0.880$, 1Q1R20 vs 2Q1R20 $p=0.496$, 1Q2L1 vs 2Q2L1 $p=0.705$, 1Q1L1 vs 2Q1L1 $p=1.000$, 1Q2L20 vs 2Q2L20 $p=0.545$, 1Q1L20 vs 2Q1L20 $p=0.545$).

3.2.4.1 Korrelation von Durchführungszeiten und Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 2

In Gruppe 1 zeigte sich mit der rechten Hand sowohl anfangs als auch am Ende des Übungsblocks für alle Strecken ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel und den Bewegungszeiten (1T1R1 * 1P1R1 $r=0.952$ $p=0.000$, 1T2R1 * 1P2R1 $r=0.991$ $p=0.000$, 1T3R1 * 1P3R1 $r=0.968$ $p=0.000$, 1T4R1 * 1P4R1 $r=0.942$ $p=0.000$, 1T1R20 * 1P1R20 $r=0.987$ $p=0.000$, 1T2R20 * 1P2R20 $r=0.985$ $p=0.000$, 1T3R20 * 1P3R20 $r=0.911$ $p=0.000$, 1T4R20 * 1P4R20 $r=0.961$ $p=0.000$).

Für die zweite Hand (linke Hand) ergab sich, mit Ausnahme der Strecke 3, am Anfang des ersten Übungsblocks, ebenso eine signifikante Korrelation für alle Strecken am Anfang und Ende des Übungsblocks (1T1L1 * 1P1L1 $r=0.971$ $p=0.000$, 1T2L1 * 1P2L1 $r=0.977$ $p=0.000$, 1T3L1 * 1P3L1 $r=0.320$ $p=0.367$, 1T4L1 * 1P4L1 $r=0.973$ $p=0.000$, 1T1L20 * 1P1L20 $r=0.994$ $p=0.000$, 1T2L20 * 1P1L20 $r=0.953$ $p=0.000$, 1T3L20 * 1P3L20 $r=0.982$ $p=0.000$, 1T4L20 * 1P4L20 $r=0.989$ $p=0.000$).

In den geglätteten Werten am Anfang und Ende des Übungsblocks zeigte sich jedoch wieder für alle Strecken eine hohe Korrelation (1T1LA * 1P1LA $r=0.988$ $p=0.000$, 1T2LA * 1P2LA $r=0.997$ $p=0.000$, 1T3LA * 1P3LA $r=0.941$ $p=0.000$, 1T4LA * 1P4LA $r=0.947$ $p=0.000$, 1T1LE * 1P1LE $r=0.994$ $p=0.000$, 1T2LE * 1P2LE $r=0.969$ $p=0.000$, 1T3LE * 1P3LE $r=0.991$ $p=0.000$, 1T4LE * 1P4LE $r=0.984$ $p=0.000$).

In Gruppe 2 fand sich, wie in der ersten Gruppe, am Anfang und Ende des Übungsblocks eine signifikante Korrelation (2T1L1 * 2P1L1 $r=0.952$ $p=0.000$, 2T2L1 * 2P2L1 $r=0.964$ $p=0.000$, 2T3L1 * 2P3L1 $r=0.943$ $p=0.000$, 2T4L1 * 2P4L1 $r=0.930$ $p=0.000$, 2T1L20 * 2P1L20 $r=0.915$ $p=0.000$, 2T2L20 * 2P2L20 $r=0.936$ $p=0.000$, 2T3L20 * 2P3L20 $r=0.780$ $p=0.008$, 2T4L20 * 2P4L20 $r=0.854$ $p=0.002$).

Mit der zweiten Hand (rechte Hand) erreicht die zweite Gruppe für alle Strecken, außer für Strecke 4 am Ende des Übungsblocks, eine signifikante Korrelation (2T1R1 * 2P1R1 $r=0.909$ $p=0.000$, 2T2R1 * 2P2R1 $r=0.804$ $p=0.005$, 2T3R1 * 2P3R1 $r=0.859$ $p=0.001$, 2T4R1 * 2P4R1 $r=0.691$ $p=0.027$, 2T1R20 * 2P1R20 $r=0.949$ $p=0.000$, 2T2R20 * 2P2R20 $r=0.932$ $p=0.000$, 2T3R20 * 2P3R20 $r=0.902$ $p=0.000$, 2T4R20 * 2P4R20 $r=0.536$ $p=0.110$).

Nach der Glättung zeigte sich jedoch wiederum für alle Strecken eine klare Korrelation (2T1RA * 2P1RA $r=0.952$ $p=0.000$, 2T2RA * 2P2RA $r=0.906$ $p=0.000$, 2T3RA * 2P3RA $r=0.855$ $p=0.002$, 2T4RA * 2P4RA $r=0.795$ $p=0.006$, 2T1RE * 2P1RE $r=0.977$ $p=0.000$, 2T2RE * 2P2RE $r=0.951$ $p=0.000$, 2T3RE * 2P3RE $r=0.888$ $p=0.001$, 2T4RE * 2P4RE $r=0.776$ $p=0.001$). Es zeigte sich, wie in Figur 1, eine insgesamt gute Korrelation, die Korrelationskoeffizienten in Gruppe 2 waren insgesamt jedoch etwas niedriger.

3.2.4.2 Korrelation von Durchführungszeiten und Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 3

In Gruppe 1 zeigte sich mit der rechten Hand sowohl am Anfang als auch am Ende des ersten Übungsblocks für alle Strecken ein hochsignifikanter Zusammenhang (1T1R1 * 1P1R1 $r=0.968$ $p=0.000$, 1T2R1 * 1P2R1 $r=0.970$ $p=0.000$, 1T3R1 * 1P3R1 $r=0.942$ $p=0.000$, 1T4R1 * 1P4R1 $r=0.829$ $p=0.003$, 1T1R20 * 1P1R20 $r=0.958$ $p=0.000$, 1T2R20 * 1P2R20 $r=0.979$ $p=0.000$, 1T3R20 * 1P3R20 $r=0.955$ $p=0.000$, 1T4R20 * 1P4R20 $r=0.927$ $p=0.000$).

Für die zweite Hand (linke Hand) ergab sich ebenso eine signifikante Korrelation für alle Strecken am Anfang und am Ende des Übungsblocks (1T1L1 * 1P1L1 $r=0.982$ $p=0.000$, 1T2L1 * 1P2L1 $r=0.921$ $p=0.000$, 1T3L1 * 1P3L1 $r=0.885$ $p=0.001$, 1T4L1 * 1P4L1 $r=0.920$ $p=0.000$, 1T1L20 * 1P1L20 $r=0.967$ $p=0.000$, 1T2L20 * 1P2L20 $r=0.948$ $p=0.000$, 1T3L20 * 1P3L20 $r=0.934$ $p=0.000$, 1T4L20 * 1P4L20 $r=0.950$ $p=0.000$).

In Gruppe 2 zeigte sich für die linke Hand nur für Strecke 4 am Anfang und am Ende des Übungsblocks sowie für Strecke 3 am Ende des Übungsblocks keine signifikante Korrelation (2T1L1 * 2P1L1 $r=0.757$ $p=0.011$, 2T2L1 * 2P2L1 $r=0.756$ $p=0.011$, 2T3L1 * 2P3L1 $r=0.631$ $p=0.050$, 2T4L1 * 2P4L1 $r=0.494$ $p=0.147$, 2T1L20 * 2P1L20 $r=0.848$ $p=0.002$, 2T2L20 * 2P2L20 $r=0.817$ $p=0.004$, 2T3L20 * 2P3L20 $r=0.579$ $p=0.079$, 2T4L20 * 2P4L20 $r=0.424$ $p=0.222$).

Nach der Glättung ließ sich jedoch für Strecke 4 am Anfang des Übungsblocks keine Korrelation nachweisen (2T1LA * 2P1LA $r=0.662$ $p=0.037$, 2T2LA * 2P2LA $r=0.833$ $p=0.003$, 2T3LA * 2P3LA $r=0.974$ $p=0.000$, 2T4LA * 2P4LA $r=0.170$ $p=0.639$, 2T1LE * 2P1LE $r=0.764$ $p=0.010$, 2T2LE * 2P2LE $r=0.856$ $p=0.002$, 2T3LE * 2P3LE $r=0.771$ $p=0.009$, 2T4LE * 2P4LE $r=0.642$ $p=0.045$).

Mit der zweiten Hand (rechte Hand) erreichte die zweite Gruppe ebenfalls für Strecke 4 am Ende des Übungsblocks keine signifikante Korrelation (2T1R1 * 2P1R1 $r=0.676$ $p=0.032$, 2T2R1 * 2P2R1 $r=0.845$ $p=0.002$, 2T3R1 * 2P3R1 $r=0.742$ $p=0.014$, 2T4R1 * 2P4R1 $r=0.707$ $p=0.022$, 2T1R20 * 2P1R20 $r=0.957$ $p=0.000$, 2T2R20 * 2P2R20 $r=0.837$ $p=0.003$, 2T3R20 * 2P3R20 $r=0.824$ $p=0.003$, 2T4R20 * 2P4R20 $r=0.405$ $p=0.245$). Nach der Glättung war jedoch wieder für alle Strecken eine gute Korrelation vorhanden (2T1RA * 2P1RA $r=0.695$ $p=0.026$, 2T2RA * 2P2RA $r=0.841$ $p=0.002$, 2T3RA * 2P3RA $r=0.785$ $p=0.007$, 2T4RA * 2P4RA $r=0.671$ $p=0.045$, 2T1RE * 2P1RE $r=0.956$ $p=0.000$, 2T2RE * 2P2RE $r=0.875$ $p=0.001$, 2T3RE * 2P3RE $r=0.813$ $p=0.004$, 2T4RE * 2P4RE $r=0.728$ $p=0.017$).

Bei insgesamt guter Korrelation der Werte fällt auf, daß die Korrelationskoeffizienten in Gruppe 1 höher waren, und daß in Gruppe 2 teilweise auch keine signifikante Korrelation erreicht wurde, was in Figur 1 und 2 nicht so klar zu Geltung kam, da die Korrelationskoeffizienten dort ebenso insgesamt höher waren.

3.3 Antworten

1. Neben der Bewegungszeit als Performancevariable hat sich die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel als stabiler und übersichtlicher Parameter zur Operationalisierung motorischen Lernens erwiesen.
Eine Reduktion des Quotienten der Bewegungszeiten zur Darstellung der konstanten Figurzeit ließ sich im Rahmen der Trackingaufgabe nicht belegen.
2. Ein kontralateraler Transfer zeigte sich ebenfalls für die Bewegungszeiten und die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel, jedoch kaum für die Quotienten der Bewegungszeiten. Das Ausmaß des Transfers war abhängig von der Komplexität der Aufgabe.
3. Eine bevorzugte Transferrichtung ließ sich von der rechten Hemisphäre zur linken Hemisphäre nachweisen.

3.4 Zusammenfassung der Gruppenergebnisse

Experiment 1: Durchführungszeit in Figur 1

	Verbesserung in den Strecken 1 und 2	Nach Glättung
Übungsblock 1 Gruppe 1 Gruppe 2	signifikant signifikant	signifikant signifikant
Übungsblock 2 Gruppe 1 Gruppe 2	- signifikant	- signifikant
Transfer 1 Gruppe 1 Gruppe 2	positiv positiv	positiv positiv
Transfer 2 Gruppe 1 Gruppe 2	positiv positiv	positiv positiv
Gruppenvergleich erste Hand Anfang Ende zweite Hand Anfang Ende linke Hand Anfang Ende rechte Hand Anfang Ende	Kein Unterschied Kein Unterschied Kein Unterschied Kein Unterschied G 1: signifikant Kein Unterschied G 2: signifikant 2 Kein Unterschied	Kein Unterschied Kein Unterschied Kein Unterschied Kein Unterschied G 1: signifikant Kein Unterschied Kein Unterschied Kein Unterschied

Die Strecken sind mit Ziffern bezeichnet,
 G1 bzw. G2 nennt einen Vorteil der jeweiligen Gruppe, $p=0.05$

Experiment 1: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 1

		Verbesserung in den Strecken 1 und 2	Nach Glättung
Übungsblock 1	Gruppe 1	signifikant	signifikant
	Gruppe 2	signifikant	signifikant
Übungsblock 2	Gruppe 1	-	signifikant 2
	Gruppe 2	signifikant	signifikant
Transfer 1	Gruppe 1	positiv	positiv
	Gruppe 2	positiv	positiv
Transfer 2	Gruppe 1	positiv	positiv
	Gruppe 2	positiv	positiv
Gruppenvergleich			
erste Hand		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			
zweite Hand		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			
linke Hand		G 1: signifikant 1	Kein Unterschied
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			
rechte Hand		G 2: signifikant 2	G 2: signifikant 1
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			

Experiment 1: Quotient der Durchführungszeiten in Figur 1

	Verbesserung des Strecken 1	Nach Glättung
Übungsblock 1		
Gruppe 1	-	-
Gruppe 2	-	-
Übungsblock 2		
Gruppe 1	-	-
Gruppe 2	-	-
Übungsblock 1 + 2		
Gruppe 1	-	signifikant
Gruppe 2	signifikant	signifikant
Transfer 1		
Gruppe 1	-	positiv
Gruppe 2	-	-
Transfer 2		
Gruppe 1	positiv	positiv
Gruppe 2	positiv	positiv
Gruppenvergleich		
erste Hand		
Anfang	G 2: signifikant	Kein Unterschied
Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
zweite Hand		
Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
linke Hand		
Anfang	G 1: signifikant	G 1: signifikant
Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
rechte Hand		
Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied

Experiment 2: Durchführungszeit in Figur 2

		Verbesserung in den Strecken 1 - 4	Nach Glättung
Übungsblock 1	Gruppe 1	signifikant	signifikant
	Gruppe 2	signifikant	signifikant
Übungsblock 2	Gruppe 1	signifikant 3	signifikant 2
	Gruppe 2	-	signifikant
Transfer 1	Gruppe 1	signifikant	signifikant
	Gruppe 2	signifikant 1, 3, 4	signifikant
Transfer 2	Gruppe 1	positiv 2	positiv 2, 3, 4
	Gruppe 2	positiv 1, 3, 4	positiv 1, 3, 4
Gruppenvergleich			
erste Hand		Kein Unterschied	G 2: signifikant 3
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			
zweite Hand		G 2: signifikant 1	Kein Unterschied
Anfang		G 2: sign. 1, 3, 4	G 2: signifikant 1, 3
Ende			
linke Hand		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			
rechte Hand		G 2: signifikant	G 2: signifikant
Anfang		Kein Unterschied	G 2: signifikant 3, 4
Ende			

Experiment 2: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 2

		Verbesserung in den Strecken 1 - 4	Nach Glättung
Übungsblock 1	Gruppe 1	signifikant	signifikant
	Gruppe 2	signifikant	signifikant
Übungsblock 2	Gruppe 1	signifikant 2	signifikant 2
	Gruppe 2	signifikant 2	signifikant 1, 2
Transfer 1	Gruppe 1	positiv	positiv
	Gruppe 2	positiv 1, 3, 4	positiv
Transfer 2	Gruppe 1	positiv	positiv
	Gruppe 2	positiv	positiv
Gruppenvergleich			
	erste Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	zweite Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	G 1: signifikant 4
	Ende	Kein Unterschied	G 1: signifikant 1
	linke Hand		
	Anfang	G 1: signifikant 3	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	rechte Hand		
	Anfang	G 2: signifikant	G 2: signifikant
	Ende	Kein Unterschied	G 1: signifikant 1, 4

Experiment 2: Quotient der Durchführungszeiten in Figur 2

		Verbesserung des Quotienten 1 und 2	Nach Glättung
Übungsblock 1	Gruppe 1	-	-
	Gruppe 2	signifikant 1	signifikant 2
Übungsblock 2	Gruppe 1	-	signifikant 2
	Gruppe 2	-	-
Übungsblock 1 + 2	Gruppe 1	signifikant 2	signifikant 2
	Gruppe 2	signifikant 2	-
Transfer 1	Gruppe 1	-	positiv 2
	Gruppe 2	-	-
Transfer 2	Gruppe 1	positiv	positiv 2
	Gruppe 2	positiv	positiv 1, 3, 4
Gruppenvergleich	erste Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	zweite Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	linke Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	rechte Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied

Experiment 2: Durchführungszeit in Figur 3

		Verbesserung in den Strecken 1 - 4	Nach Glättung
Übungsblock 1	Gruppe 1	signifikant 1, 4	signifikant 1, 4
	Gruppe 2	-	signifikant 1
Übungsblock 2	Gruppe 1	-	-
	Gruppe 2	signifikant 1	-
Transfer 1	Gruppe 1	positiv 1	positiv
	Gruppe 2	positiv 2	positiv
Transfer 2	Gruppe 1	positiv	positiv 1, 2, 3
	Gruppe 2	positiv	positiv 2, 3, 4
Gruppenvergleich			
erste Hand		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			
zweite Hand		G 2: signifikant 2	G 2: signifikant 2
Anfang		Kein Unterschied	G 2: signifikant 4
Ende			
linke Hand		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			
rechte Hand		G 2: signifikant 2	G 2: signifikant 2
Anfang		Kein Unterschied	Kein Unterschied
Ende			

Experiment 2: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel in Figur 3

		Verbesserung in den Strecken 1 - 4	Nach Glättung
Übungsblock 1	Gruppe 1	signifikant 1, 2	signifikant 1, 3
	Gruppe 2	-	signifikant 1
Übungsblock 2	Gruppe 1	-	-
	Gruppe 2	-	-
Transfer 1	Gruppe 1	positiv 1	positiv 1, 3
	Gruppe 2	-	positiv 3
Transfer 2	Gruppe 1	positiv	positiv
	Gruppe 2	positiv	positiv
Gruppenvergleich			
	erste Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	zweite Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	G 2: signifikant 4	G 2: signifikant 4
	linke Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	G 2: signifikant 4	Kein Unterschied
	rechte Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	G 2: signifikant 3
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied

Experiment 2: Quotient der Durchführungszeiten in Figur 3

		Verbesserung des Quotienten 1 und 2	Nach Glättung
Übungsblock 1	Gruppe 1	-	-
	Gruppe 2	-	-
Übungsblock 2	Gruppe 1	-	-
	Gruppe 2	-	-
Übungsblock 1 + 2	Gruppe 1	signifikant	signifikant
	Gruppe 2	-	-
Transfer 1	Gruppe 1	-	positiv 1, 2
	Gruppe 2	-	positiv 1
Transfer 2	Gruppe 1	positiv	positiv 2
	Gruppe 2	positiv	positiv 2, 3, 4
Gruppenvergleich	erste Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	zweite Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	linke Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	rechte Hand		
	Anfang	Kein Unterschied	Kein Unterschied
	Ende	Kein Unterschied	Kein Unterschied

Korrelation der Durchführungszeit und der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel

Experiment 1 Figur 1	Korrelation	nach Glättung
Gruppe 1 rechte Hand Anfang Ende	signifikant 1 + 2 signifikant 1 + 2	signifikant 1 + 2 signifikant 1 + 2
Gruppe 1 linke Hand Anfang Ende	signifikant 1 + 2 signifikant 1 + 2	signifikant 1 + 2 signifikant 1 + 2
Gruppe 2 rechte Hand Anfang Ende	signifikant 1 + 2 signifikant 1 + 2	signifikant 1 + 2 signifikant 1 + 2
Gruppe 2 linke Hand Anfang Ende	signifikant 1 signifikant 1 + 2	signifikant 1 signifikant 1 + 2

Experiment 2 Figur 1	Korrelation	nach Glättung
Gruppe 1 rechte Hand Anfang Ende	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4
Gruppe 1 linke Hand Anfang Ende	signifikant 1, 2 und 4 signifikant 1 - 4	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4
Gruppe 2 rechte Hand Anfang Ende	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4
Gruppe 2 linke Hand Anfang Ende	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 3	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4

Experiment 2 Figur 3	Korrelation	nach Glättung
Gruppe 1 rechte Hand Anfang Ende	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4
Gruppe 1 linke Hand Anfang Ende	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4
Gruppe 2 rechte Hand Anfang Ende	signifikant 1 - 3 signifikant 1 + 2	signifikant 1 - 3 signifikant 1 - 4
Gruppe 2 linke Hand Anfang Ende	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 3	signifikant 1 - 4 signifikant 1 - 4

3.5 Beispiele motorischen Lernens bei gesunden Probanden

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse einiger gesunder Probanden als Beispiele für die unterschiedliche Ausprägung des Lernverlaufs dargestellt.

Gezeigt werden als Diagramm jeweils die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel, die Durchführungszeiten und die Quotienten der Durchführungszeiten im Verlauf der Übung dargestellt. Zusätzlich sind im Anschluß jeweils für die Übungsdurchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 die tatsächliche Bewegungsspur mit dem entsprechenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf sowie ein Phasendiagramm aus Beschleunigung und Geschwindigkeit für den betreffenden Probanden abgebildet.

Proband RS (63 Jahre) beginnt mit der linken Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur rechten Hand. Er zeigt hinsichtlich der Durchführungszeiten und der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel einen ausgeprägten Lernverlauf. Darüber hinaus kann er die erreichten Verbesserungen der linken Hand nahezu ohne "Verluste" auf die rechte Hand übertragen und erfolgreich weiter ausbauen (Abb. 3.12).

Auch die Regression der Quotienten zeigt trotz starker Schwankungen eine klare Verkürzung (Abb. 3.13). Die errechneten Werte liegen jedoch noch weit über dem Wert 1, also der Isochronie der Durchführungszeiten. Transfereffekte der Quotienten sind kaum zu erkennen.

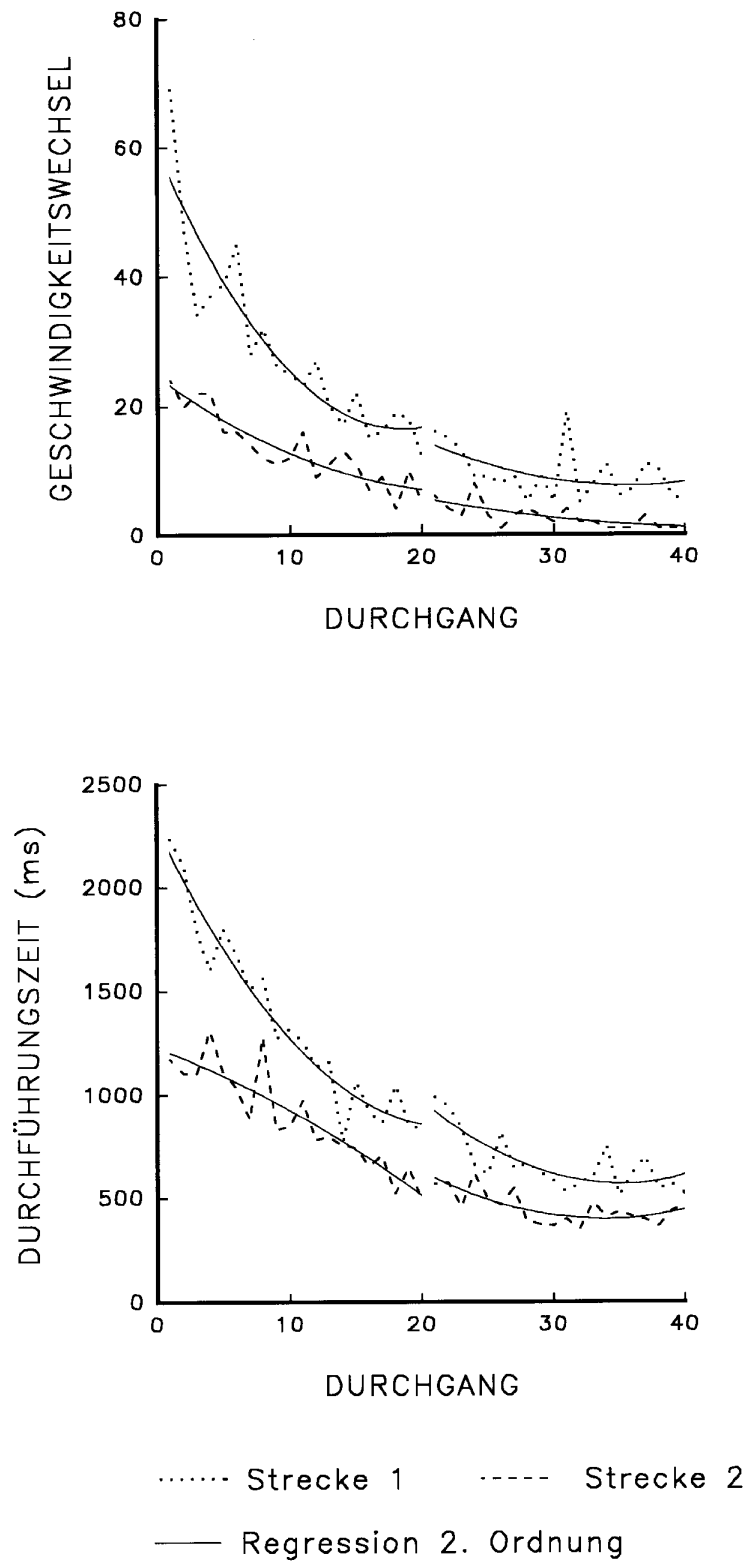


Abbildung 3.12: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (oben) und Durchführungszeiten (unten) im Übungsverlauf. **Proband RS** beginnt mit der linken Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur rechten Hand.

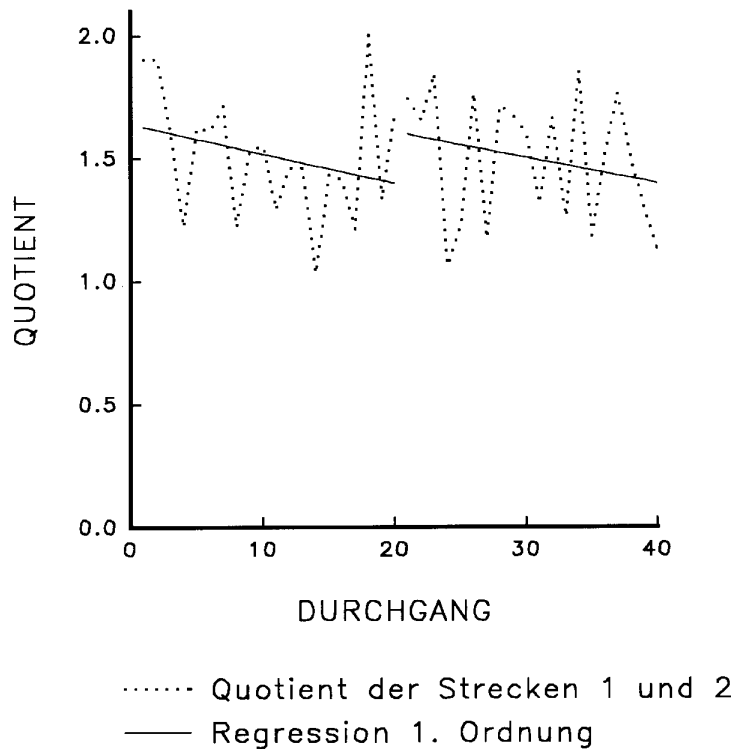


Abbildung 3.13: errechnete Quotienten der Durchführungszeiten im Übungsverlauf des **Probanden RS**, der mit der linken Hand beginnt und nach 20 Durchgängen zur rechten Hand wechselt.

Auch in den folgenden Abbildungen (Abb. 3.14 und Abb. 3.15) ist der Lernverlauf klar zu erkennen. Die Segmente des Geschwindigkeitsverlaufs werden schlanker und zum Teil eingipfelig. Das Phasendiagramm "klärt" sich zunehmend. Bemerkenswert ist, daß der Proband mit der linken Hand höhere Maximalgeschwindigkeiten erreicht als mit der rechten.

Insgesamt kann man von einem guten Lernerfolg mit angehender Automatisierung der Bewegung ausgehen.

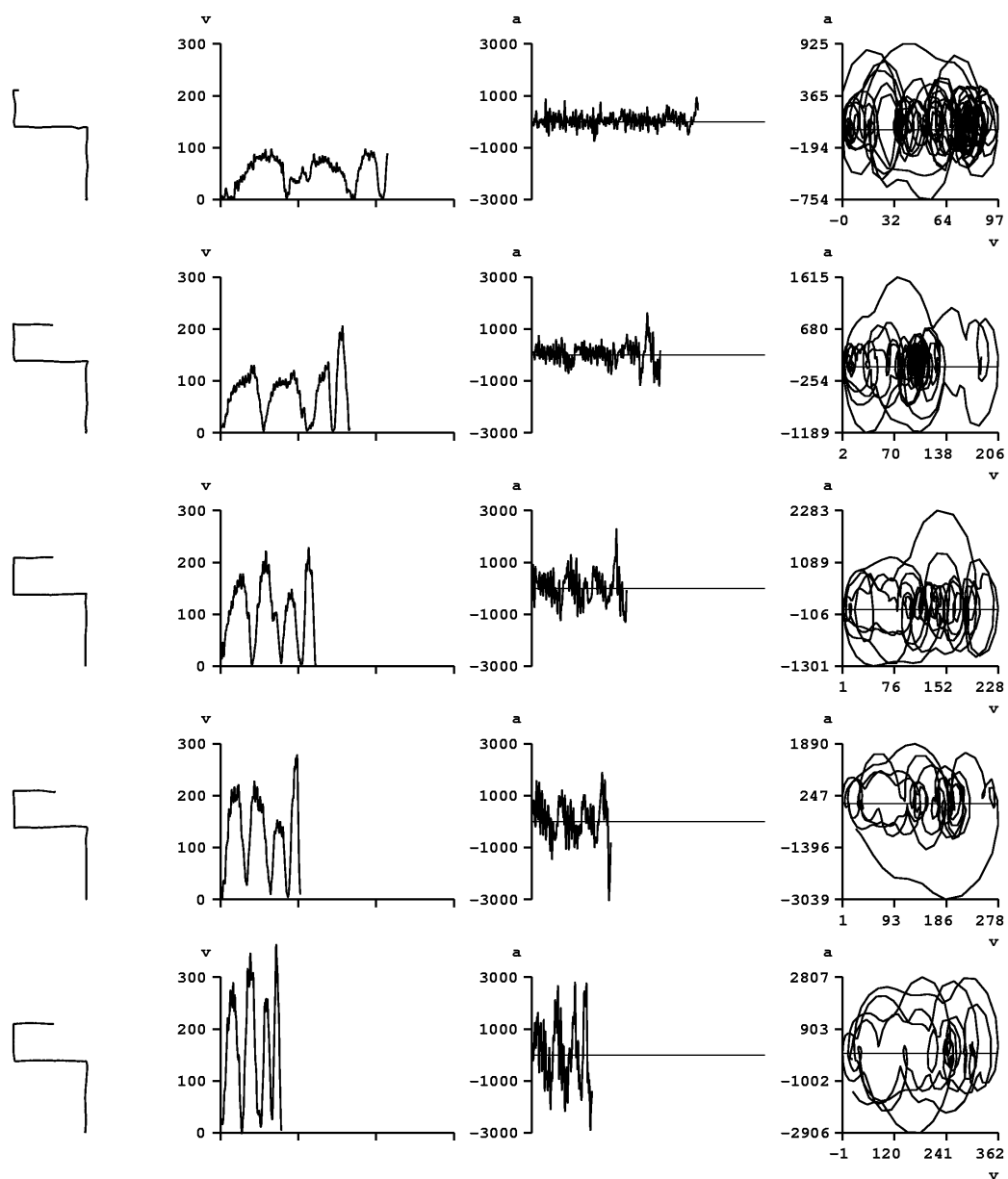


Abbildung 3.14: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der linken (ersten) Hand des **Probanden RS**.

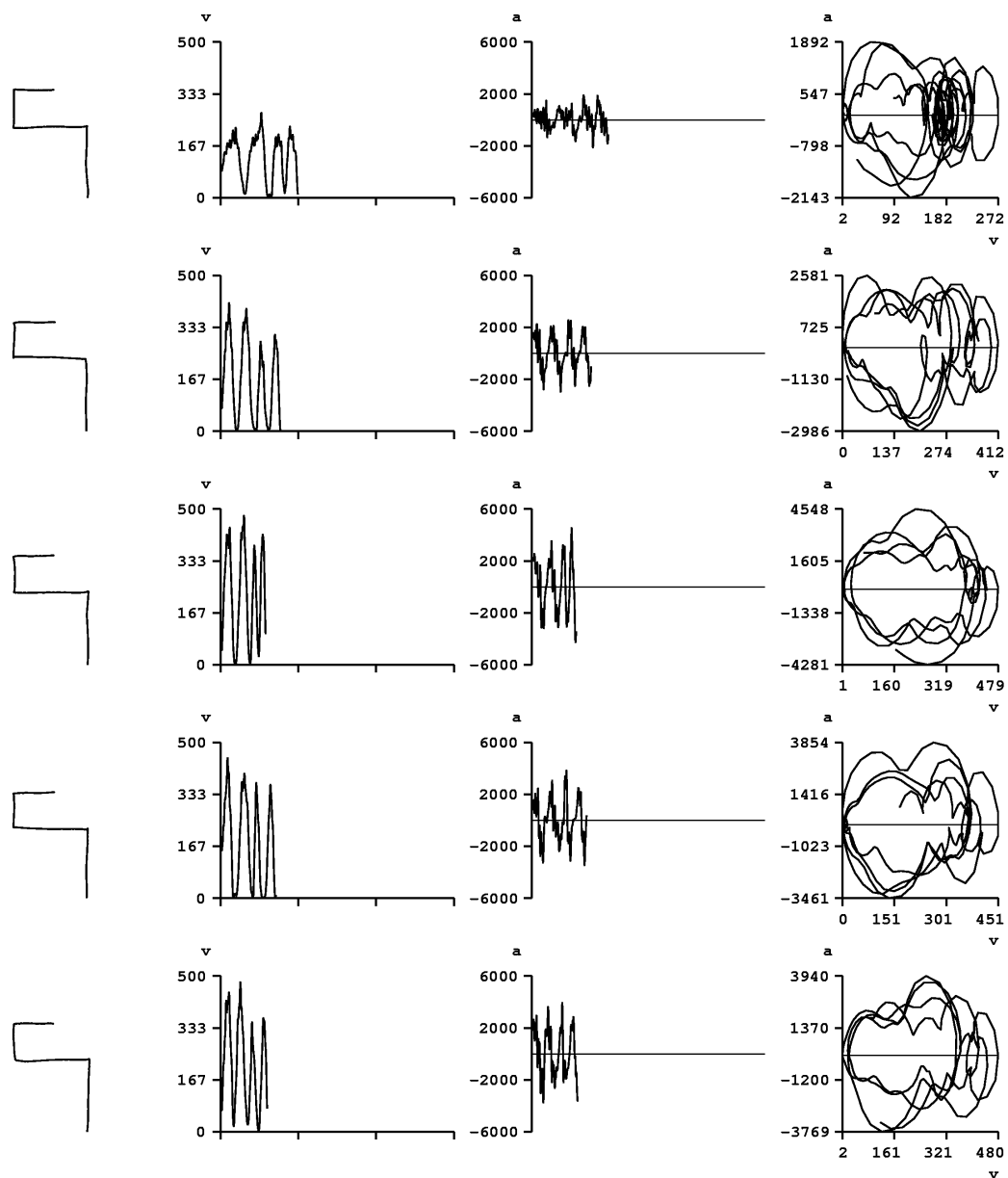


Abbildung 3.15: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der rechten (zweiten) Hand des **Probanden RS**.

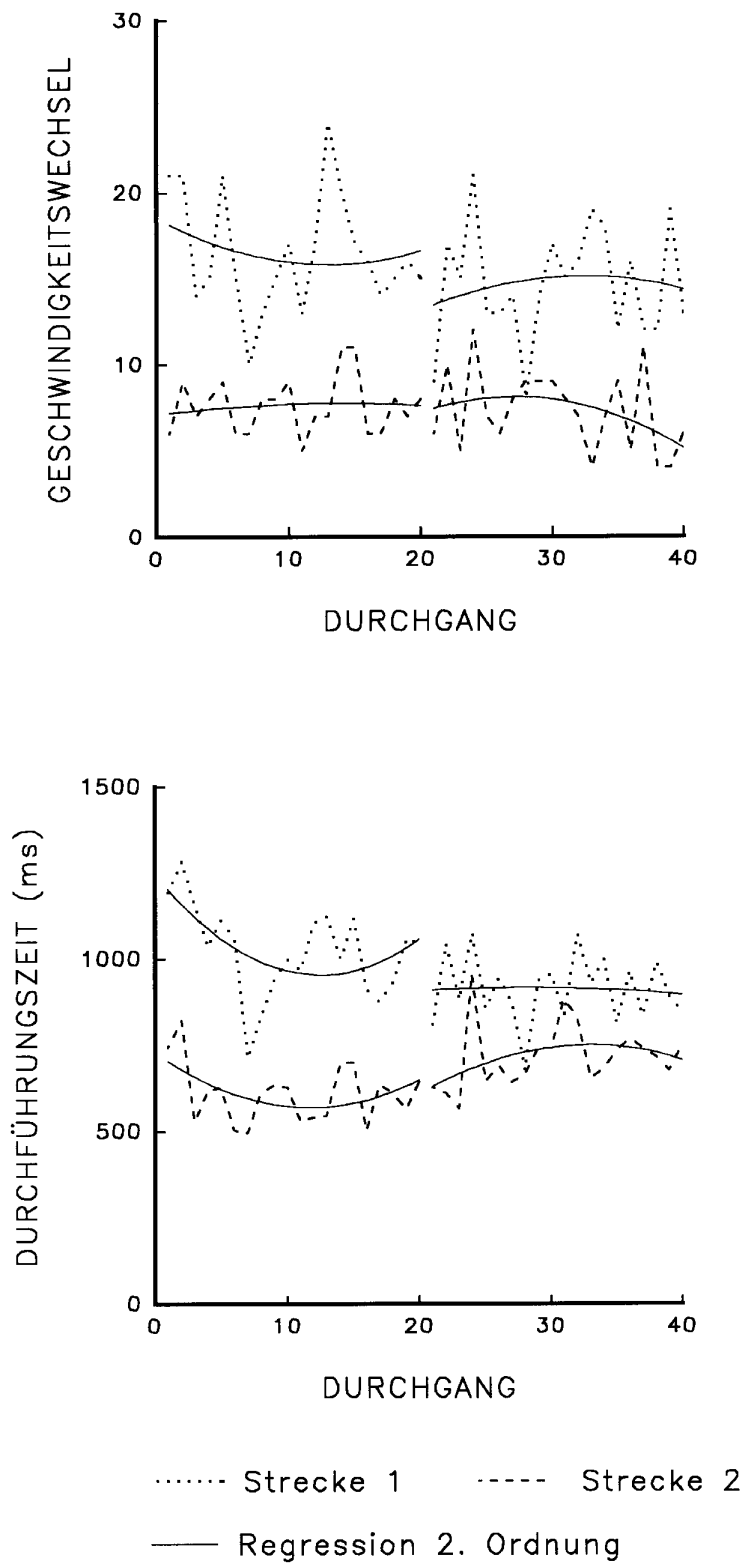


Abbildung 3.16: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (oben) und Durchführungszeiten (unten) im Übungsverlauf. **Proband FI** beginnt mit der rechten Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur linken Hand.

Proband FI (28 Jahre) begann mit der rechten Hand und wechselte nach zwanzig Durchgängen zur linken Hand. In der Untersuchung (Abb. 3.16) ist zu erkennen, daß er mit relativen kurzen Bewegungszeiten beginnt und keine wesentliche Verbesserung der Durchführungszeiten oder der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel erreicht.

Abbildung 3.17 zeigt jedoch eine Annäherung der Durchführungszeiten, also eine Reduktion des Quotienten für beide Hände (Abb. 3.17). Eine Isochronie der Strecken wird, wie auch im Diagramm der Bewegungszeiten zu erkennen ist, nicht erreicht.

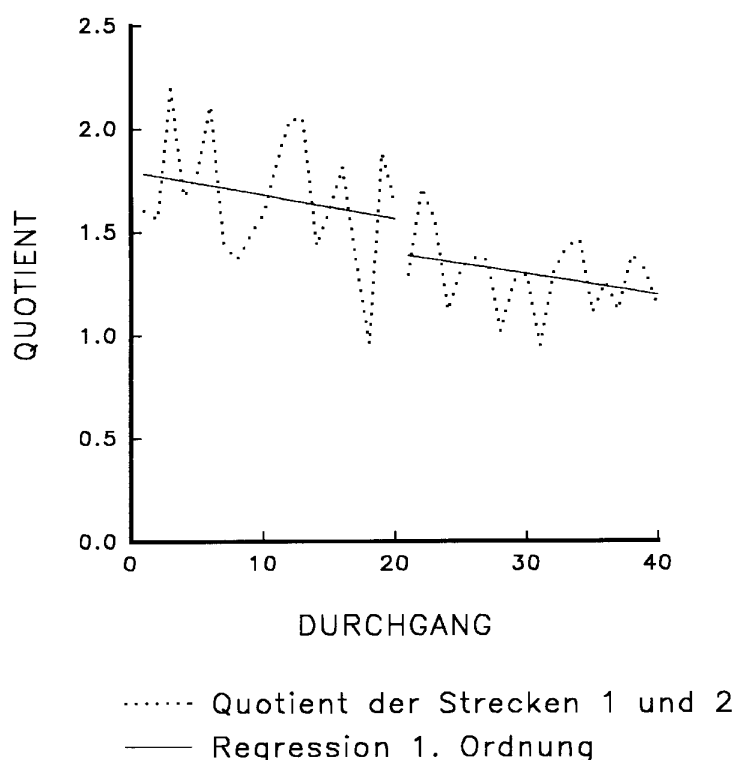


Abbildung 3.17: errechneten Quotienten der Durchführungszeiten im Übungsverlauf. **Proband FI** beginnt der mit der rechten Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur linken Hand.

Auch in den folgenden beiden Abbildungen (Abb. 3.18 und 3.19) sind kaum Verbesserungen der Leistung zu erkennen.

Im Vergleich zur rechten (ersten) Hand sind weniger Korrekturen im Geschwindigkeitsverlauf der linken Hand zu erkennen. Dies reflektiert die geringe Reduktion der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel.

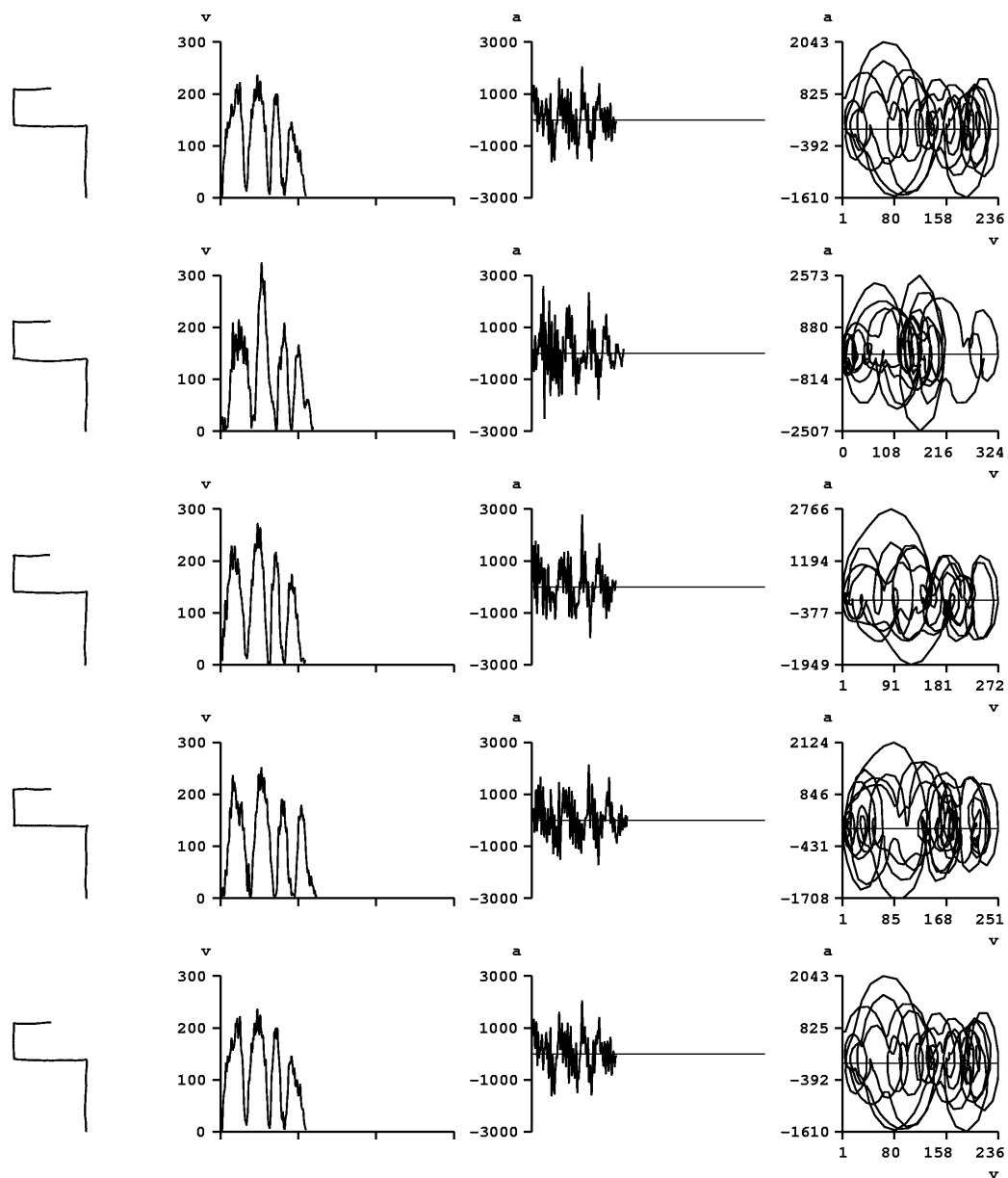


Abbildung 3.18: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der rechten (ersten) Hand des **Probanden FI**.

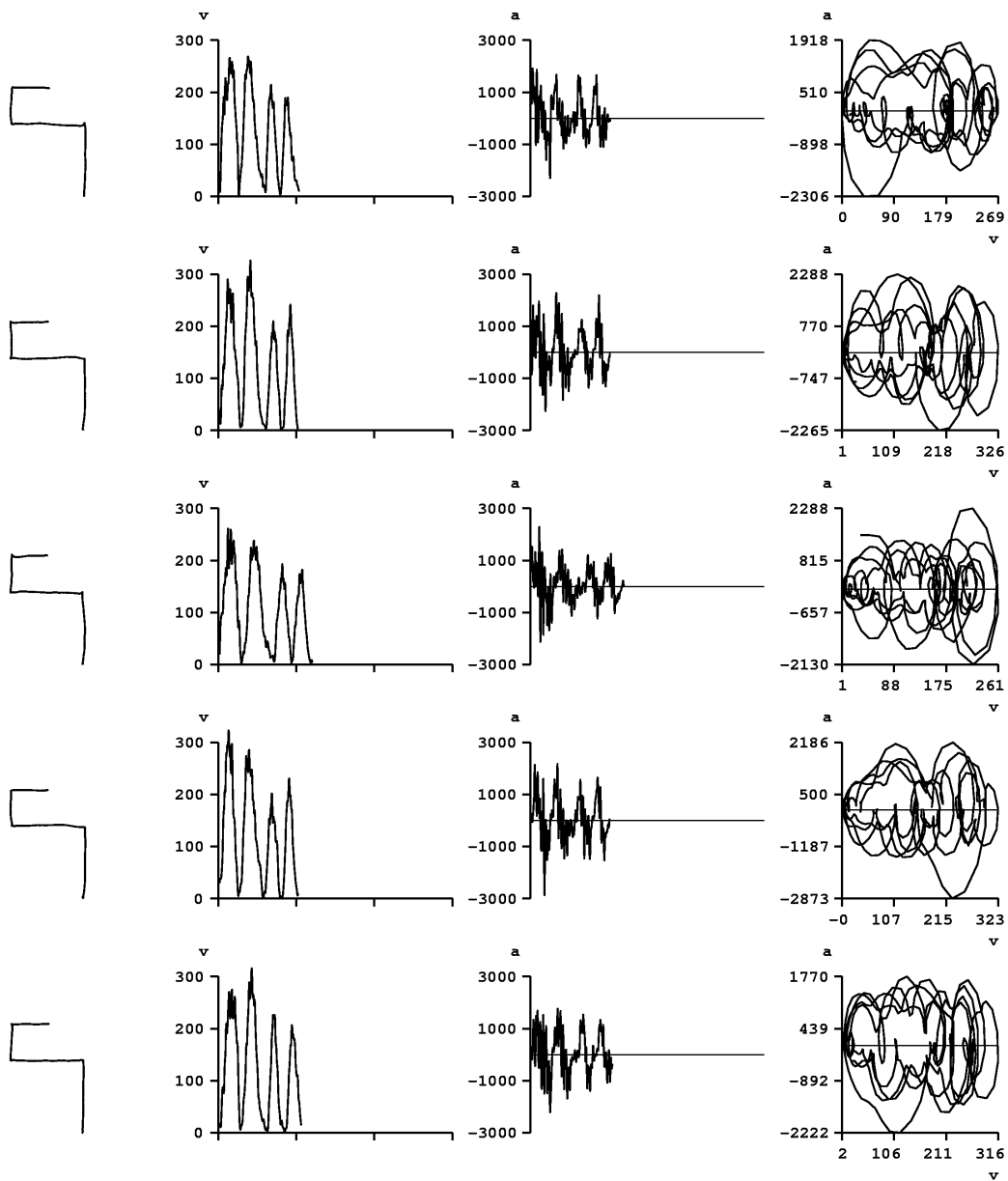


Abbildung 3.19: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der linken (zweiten) Hand des **Probanden FI**.

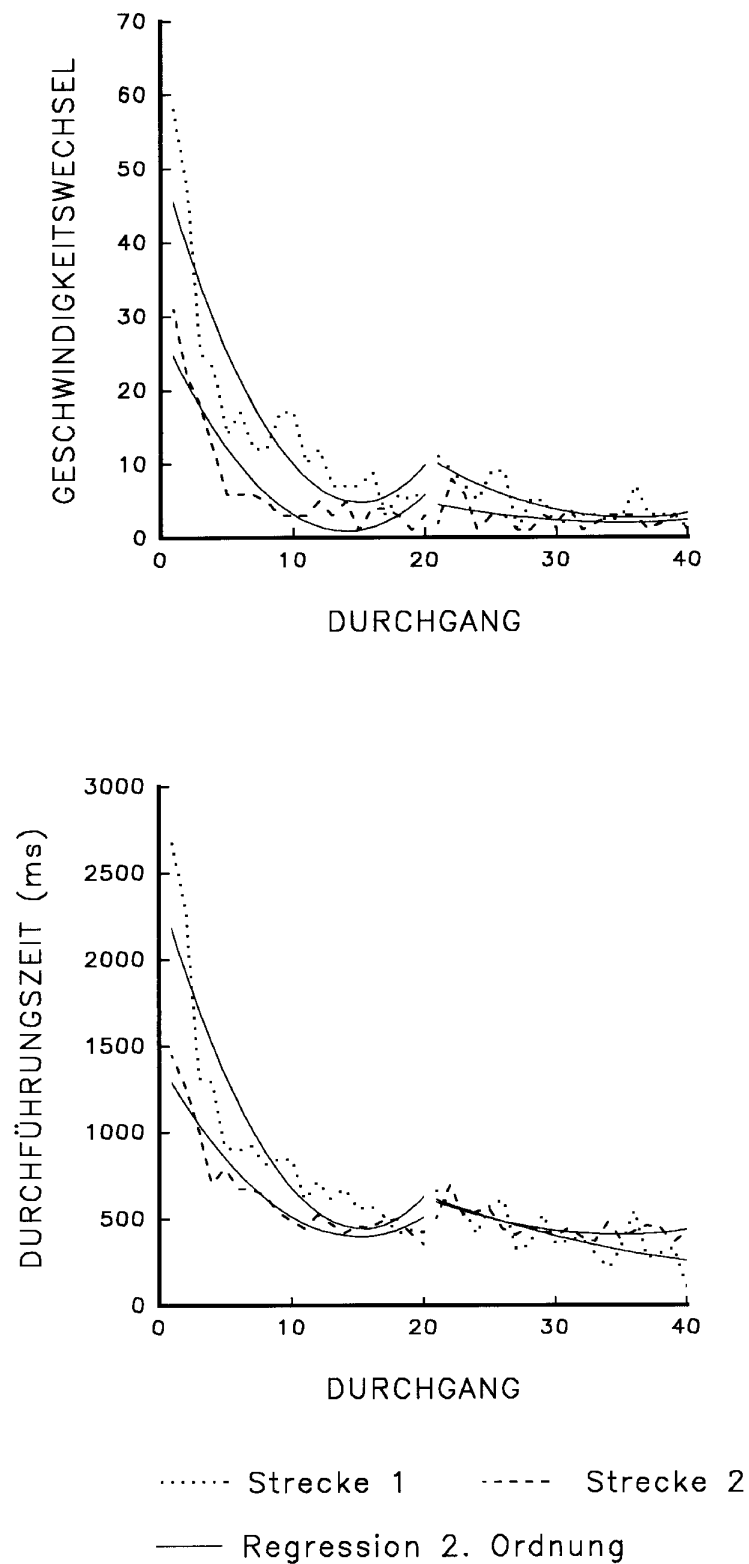


Abbildung 3.20: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (oben) und Durchführungszeiten (unten) im Übungsverlauf. **Proband SU** beginnt mit der rechten Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur linken Hand.

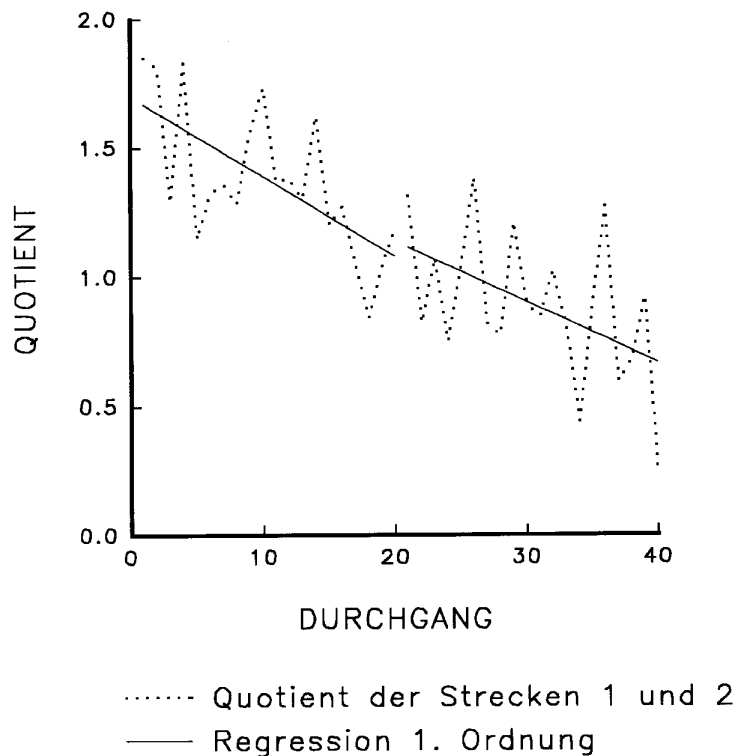


Abbildung 3.21: errechneten Quotienten der Durchführungszeiten im Übungsverlauf. **Proband SU** beginnt mit der rechten Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur linken Hand.

Proband SU (38 Jahre) beginnt mit der rechten Hand und wechselt nach zwanzig Durchgängen zur linken Hand. Er zeigt nach anfangs vielen Wechseln im Geschwindigkeitsverlauf und langen Durchführungszeiten ausgesprochen ausgeprägte Verbesserungen (Abb. 3.20). Die Bewegungszeiten für beide Strecken unterscheiden am Ende der Übungsblöcke kaum, es wurde also eine Isochronie der Bewegungszeiten erreicht.

In den Abbildungen 3.22 und 3.23 sind die meisten der dargestellten Bewegungssegmente im Geschwindigkeitsverlauf im späteren Übungsverlauf eingipfelig, und das Phasendiagramm ist relativ "klar". Während der Untersuchung war ein Strategiewechsel, weg von genauer visueller Kontrolle und hoher Genauigkeit der Bewegung hin zu einer sehr "flüssigen" Ausführung, zu beobachten. Dieser ist auch als Unterschied der Form des Geschwindigkeitsprofils zwischen dem 1. und 5. Durchgang mit der rechten Hand gut zu erkennen (Abb. 3.22).

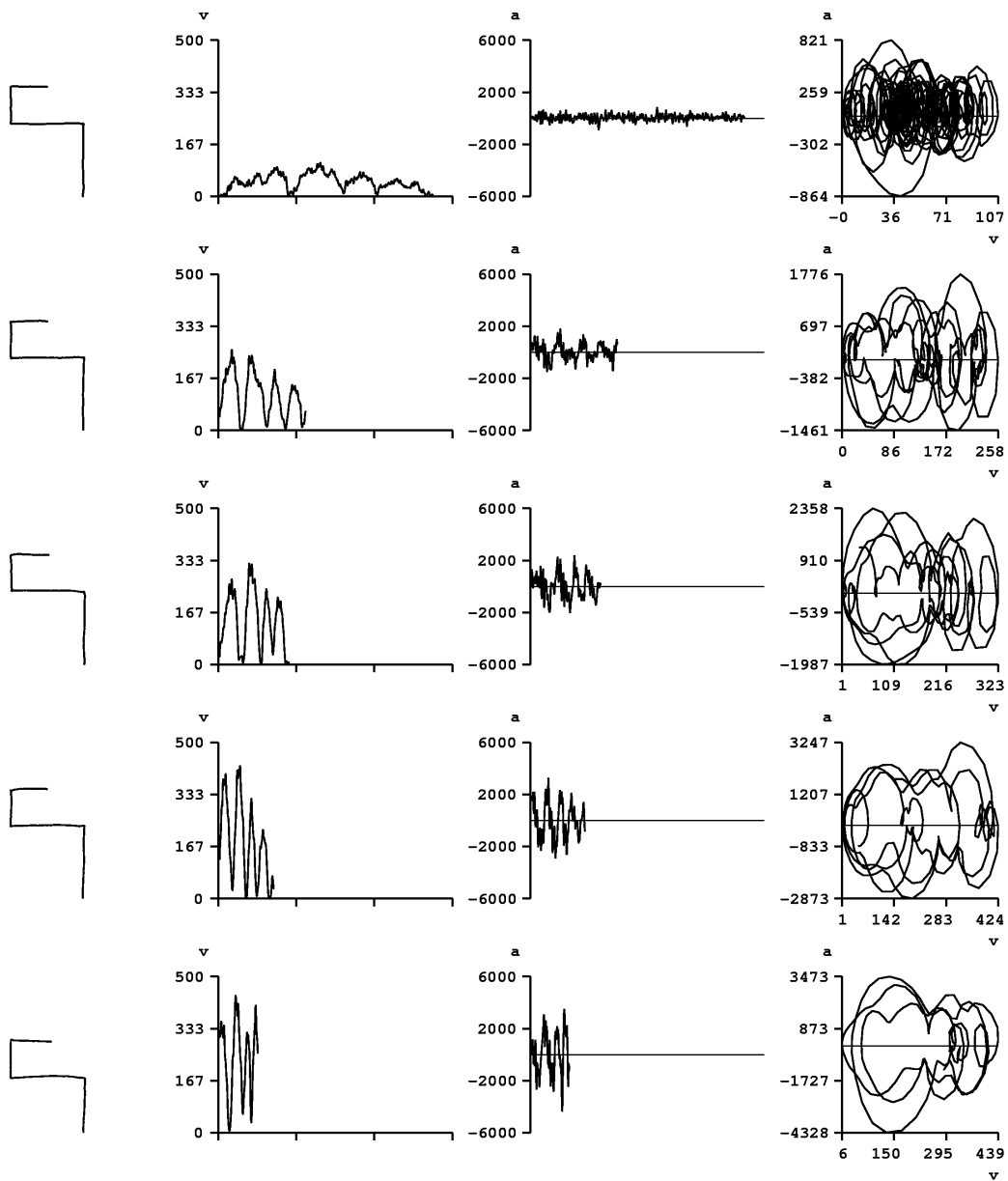


Abbildung 3.22: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der rechten (ersten) Hand des **Probanden SU**.

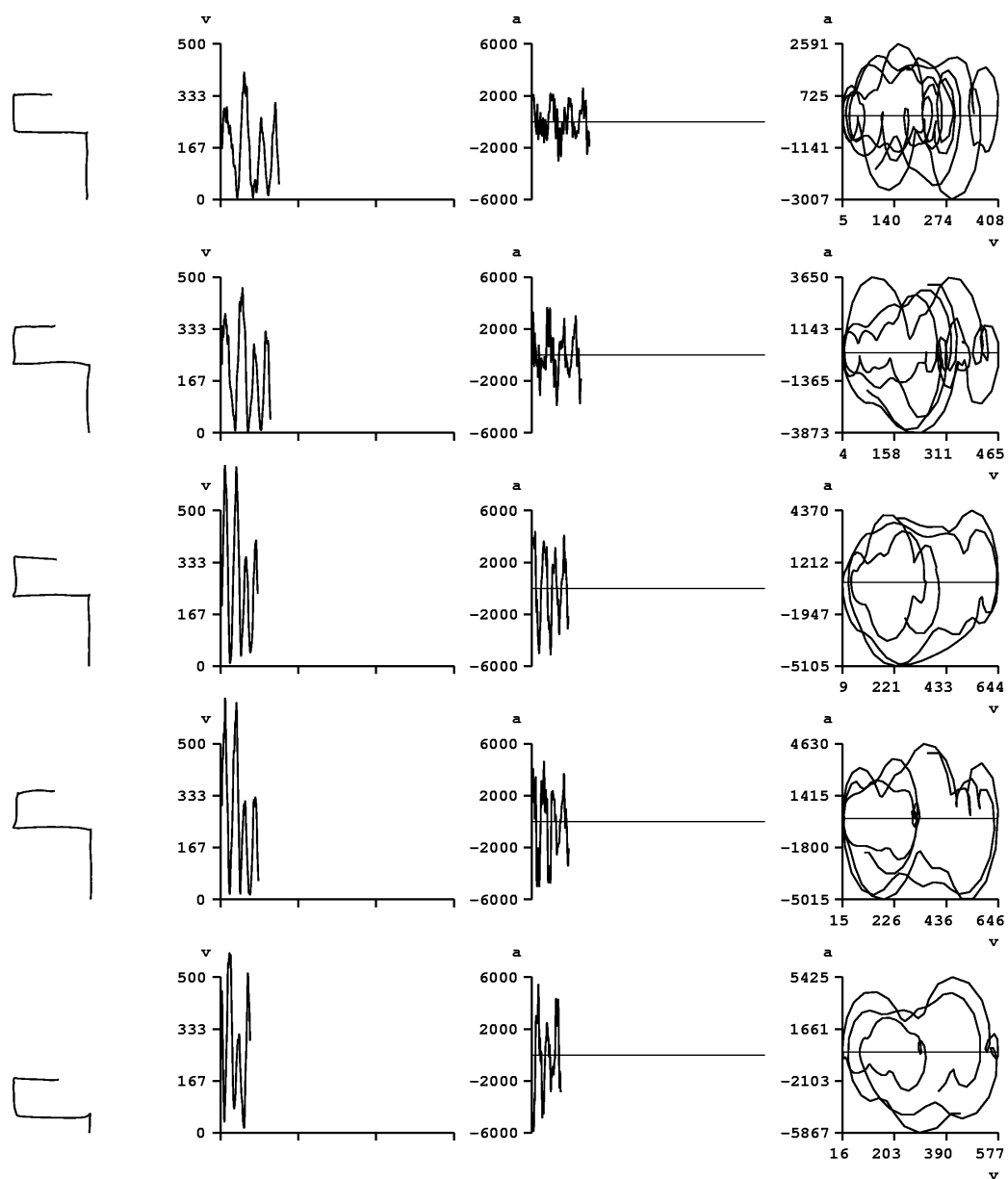


Abbildung 3.23: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, den Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der linken (zweiten) Hand des **Probanden SU**.

3.6 Beispiele motorischen Lernens bei Patienten

Sofern die Patienten überhaupt in der Lage sind die vorgelegte Figur nachzuzeichnen, weisen sie, wie auch in der neurologischen Untersuchung, meist deutliche motorische Defizite bei der Durchführung der Aufgabe auf. Die Untersuchungsergebnisse der Patienten, von denen im Folgenden einige beispielhaft dargestellt werden, ergeben eine Vielfalt unterschiedlicher Bewegungsstörungen. Das Defizit in der Bewegungskontrolle ist im Zusammenhang neurologischer Untersuchungsergebnisse wie Parese, Sensibilitätsstörung und Störung der Koordination zu sehen. Auffällig ist, daß die Beeinträchtigungen in der kinematischen Untersuchung zum Teil wesentlich klarer zu Geltung kommen als in der klinischen Untersuchung und auch von der subjektiven Einschätzung seitens der Patienten teilweise abweichen. Einige Patienten bieten, wie vielfach in der Literatur beschrieben, beidseitige motorische Defizite bei nur einseitig bekannter Hirnläsion. Essentiell ist es nach erhaltenen Leistungen zu suchen, die als Ausgangspunkt eines systematischen Trainings dienen können (Mai und Marquardt 1995).

Wie oben beschrieben beginnen die Patienten mit der motorisch besseren Hand. Der benötigte Zeitaufwand für die Untersuchung an Patienten ist vergleichsweise sehr viel höher als bei den gesunden Probanden.

Patientin EG (56 Jahre) bietet nach multiplen zerebralen Infarkten beidseits (Centrum semiovale links, im Bereich um das linke Vorderhorn und rechts okzipital) im Rahmen der Notfalloperation eines dissezierten Aortenbogenaneurismas eine proximal betonten Hemiparese rechts. Eine zusätzlich bestehende Hemiparese links hatte sich zum Zeitpunkt der Untersuchung weitgehend zurückgebildet. Die Patientin hat jedoch durch längere Immobilität, aufgrund mehrerer schwerer Komplikationen, eine Myositis ossificans im Bereich der HWS und der rechten Schulter sowie Kontrakturen in der rechten Schulter, dem rechten Ellenbogen und den Fingergelenken rechts entwickelt. Zusätzlich besteht eine sympathische Reflexdystrophie der rechten Hand.

Daraus geht hervor, daß die Patientin zum Zeitpunkt der Untersuchung sowohl unter zentralen neurologischen Defiziten als auch peripheren mechanischen Beeinträchtigungen leidet. Vor der Erkrankung war sie rechtshändig (Oldfield = 0.86). Die Patientin beginnt mit der linken Hand.

Mit der ersten Hand kann sie eine klare Reduktion der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel erreichen, die nicht auf die zweite Hand übertragen wird. Für die zweite Hand zeigt sich dagegen eine nur geringe Verbesserung bezüglich der Geschwindigkeitswechsel im Übungsverlauf (Abb. 4.24 oben).

Am Kurvenverlauf der Bewegungszeiten ist ebenfalls zu erkennen, daß die Patientin mit der linken Hand für beide ausgewerteten Strecken eine deutliche Reduktion der benötigten Durchführungszeit erreicht. Am Anfang des Übungsblocks der rechten Hand werden wiederum relativ lange Durchführungszeiten benötigt. Mit der motorisch schwächer eingeschätzten Hand kann sie Transfereffekte also kaum nutzen. Für die rechte Hand ergibt sich zusätzlich auch im Verlauf nur eine geringe Verkürzung der Bewegungszeiten (Abb. 4.24) unten. Im Vergleich zu gesunden Probanden sind die Bewegungszeiten der rechten Hand deutlich länger.

Auffallend ist darüber hinaus im Vergleich zu gesunden Probanden die starke Variation der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel als auch der Durchführungszeiten.

Um so erstaunlicher sind die Ergebnisse bei der Untersuchung der Patientin zur konstanten Figurzeit, also der Verhältnisse der Durchführungszeiten (Abb. 4.25). Für die erste Hand ergibt sich eine deutliche Reduktion des Quotienten, das heißt die Patientin kann eine klare Verkürzung der benötigten Zeit der langen Strecke im Vergleich zur kurzen erreichen. Dies ist ein Hinweis für eine zunehmende Abkoppelung der Bewegungszeit von der Bewegungsamplitude, ein typisches Zeichen der zentralen Organisation einer gut gelernten Bewegung.

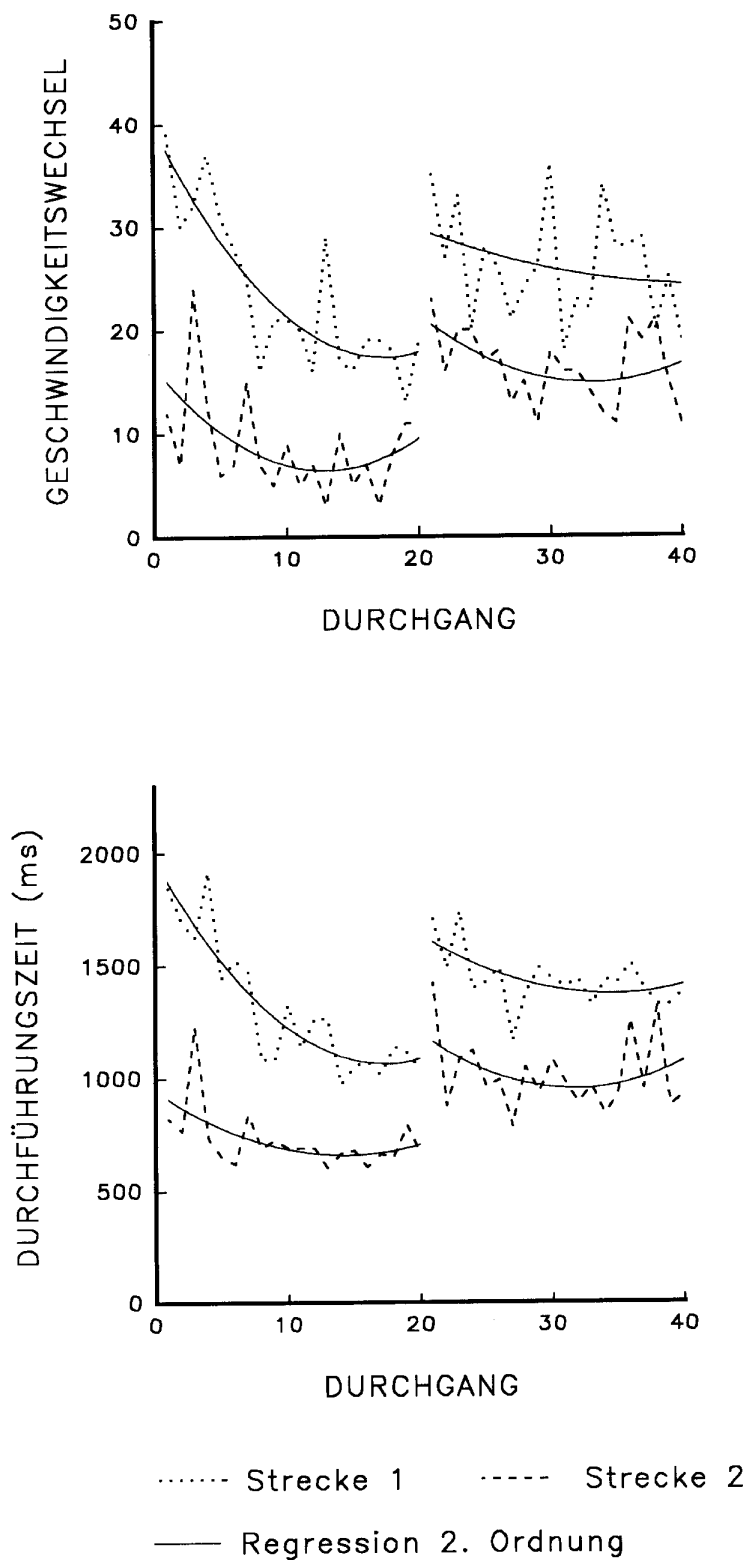


Abbildung 4.24: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (oben) und Durchführungszeiten (unten) im Übungsverlauf. **Patientin EG** beginnt mit der linken Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur rechten Hand.

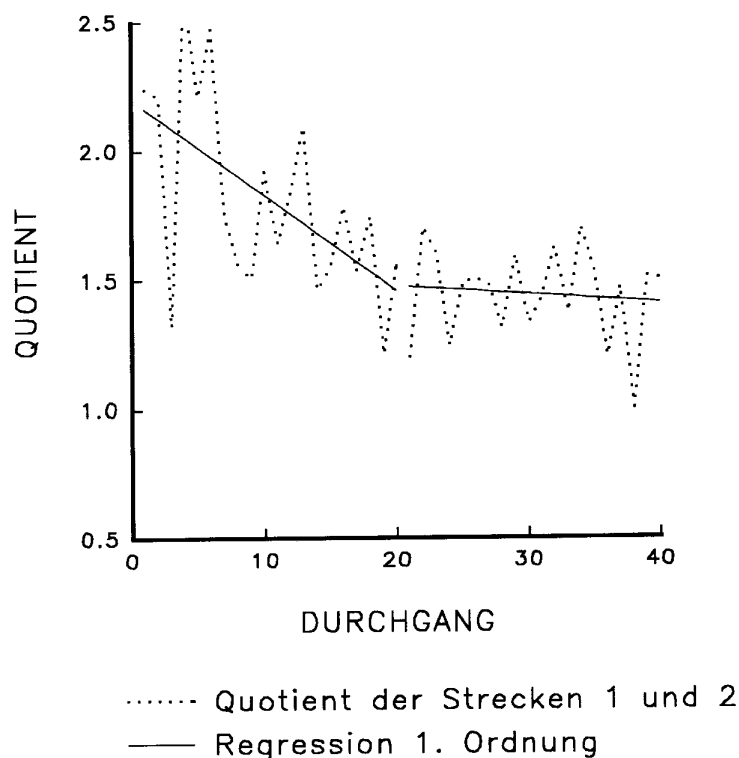


Abbildung 4.25: errechnete Quotienten der Durchführungszeiten im Übungsverlauf. Patientin EG beginnt mit der linken Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur rechten Hand.

Im Gegensatz zu den Durchführungszeiten und den Geschwindigkeitswechseln wird dieser Lernfortschritt auf die zweite Hand übertragen, die dieses Niveau halten, jedoch nicht weiter verbessern kann.

Die Vermutung liegt nahe, daß die bestehende Bewegungsstörung nicht ausschließlich durch eine tatsächlich zentrale Parese (neuronale Schädigung) verursacht ist, da einige intakte, typischerweise zentral organisierte Anteile der Bewegungskontrolle und des motorischen Lernens nachweisbar sind. Wie am Phasendiagramm beider Hände zu erkennen ist, laufen die Bewegungen noch nicht automatisiert ab. Im Übungsverlauf sieht man jedoch eine "Klärung" des Phasendiagramms. Die Bewegungsspur der linken (besseren) Hand wirkt entgegen den kinematisch guten Ergebnissen eher unsicher und würde bei alleiniger Betrachtung irreführen (Abb. 4.26).

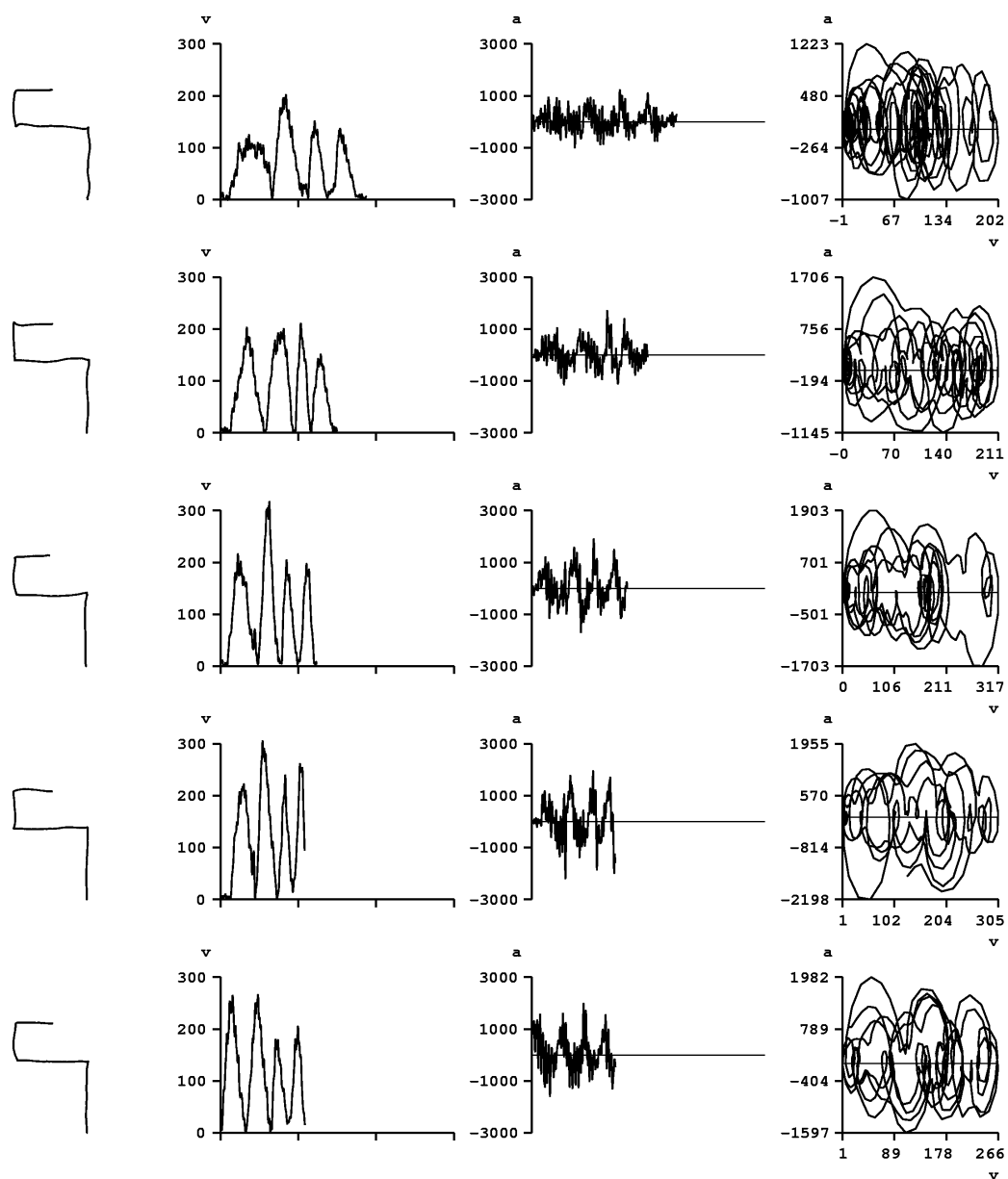


Abbildung 4.26: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der linken (ersten) Hand der **Patientin EG**.

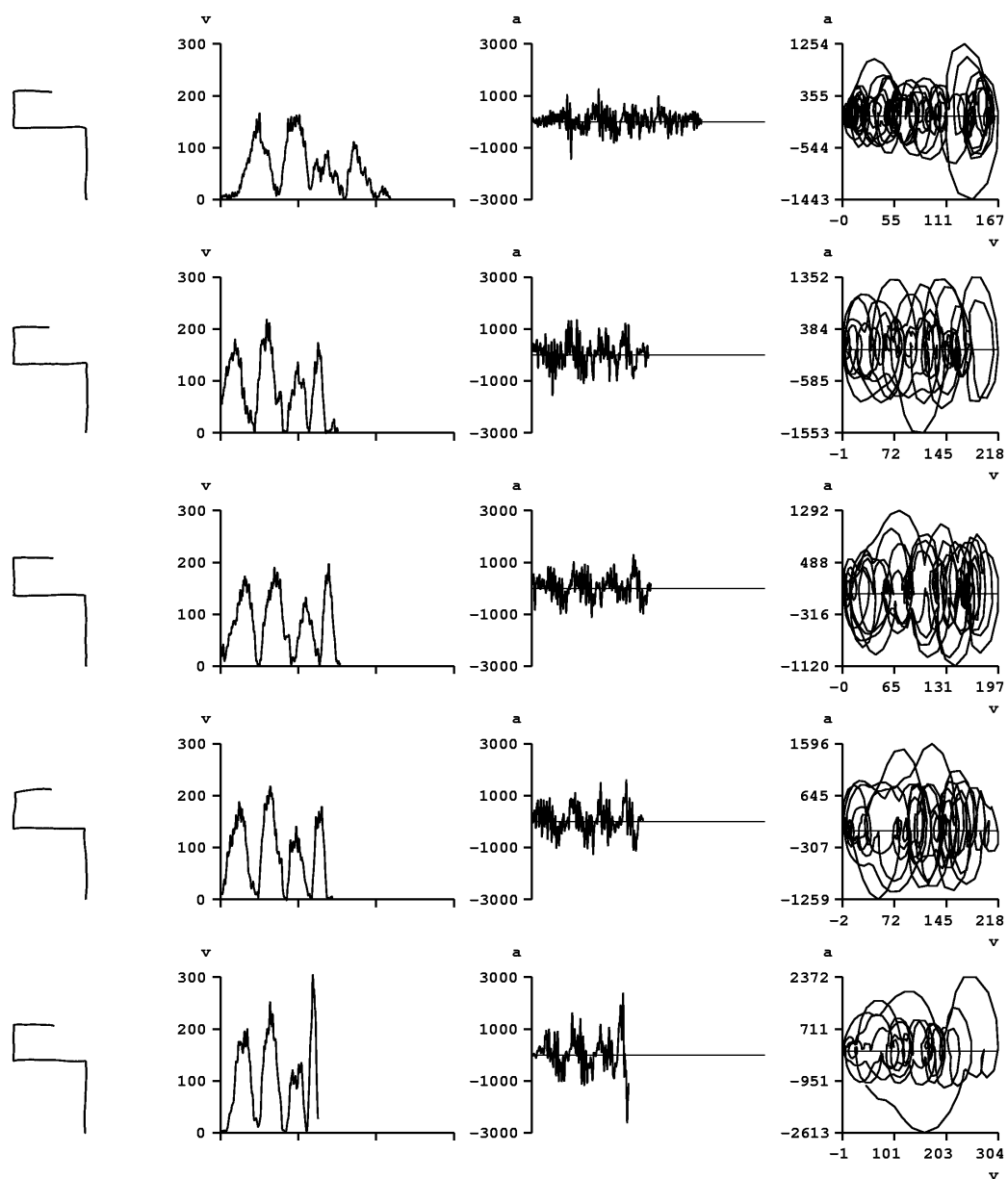


Abbildung 4.27: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der rechten (zweiten) Hand der **Patientin EG**.

Patient TK (31 Jahre) war an einem bioptisch gesicherten links präzentral gelegenen Astrozytom Grad III (WHO) unter intraoperativem motorischem Monitoring operiert worden. Die histologische Untersuchung des Tumors ergab ein anaplastisches Astrozytom Grad III mit diffuser Ausbreitungstendenz. Der Patient hatte sich wegen motorischer Krampfanfälle des rechten Arms und leichten Wortfindungsstörungen ohne zusätzliches, erkennbares neurologisches Defizit vorgestellt. Die MR Untersuchung ergab einen präzentral parasagittal gelegenen Tumor. Postoperativ zeigte der Patient nach Tumorresektion im Bereich des SMA eine temporäre Störung der Sprachinitiation und Bewegungsinitiation sowie ein Störung der von feinmotorischen Bewegungen der rechten Hand.

Subjektiv gibt der Patient zum Zeitpunkt der Untersuchung eine leichte Störung der Feinmotorik der rechten Hand an. Vor der Erkrankung war er rechtshändig (Oldfield = 1.00). Der Patient beginnt mit der linken Hand.

Mit beiden Händen erreicht der Patient eine Verbesserung der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel und der Durchführungszeiten. Diese Verbesserung ist für die rechte Hand jedoch wesentlich geringer ausgeprägt und es sind keinerlei Transfereffekte zu erkennen (Abb. 4.28).

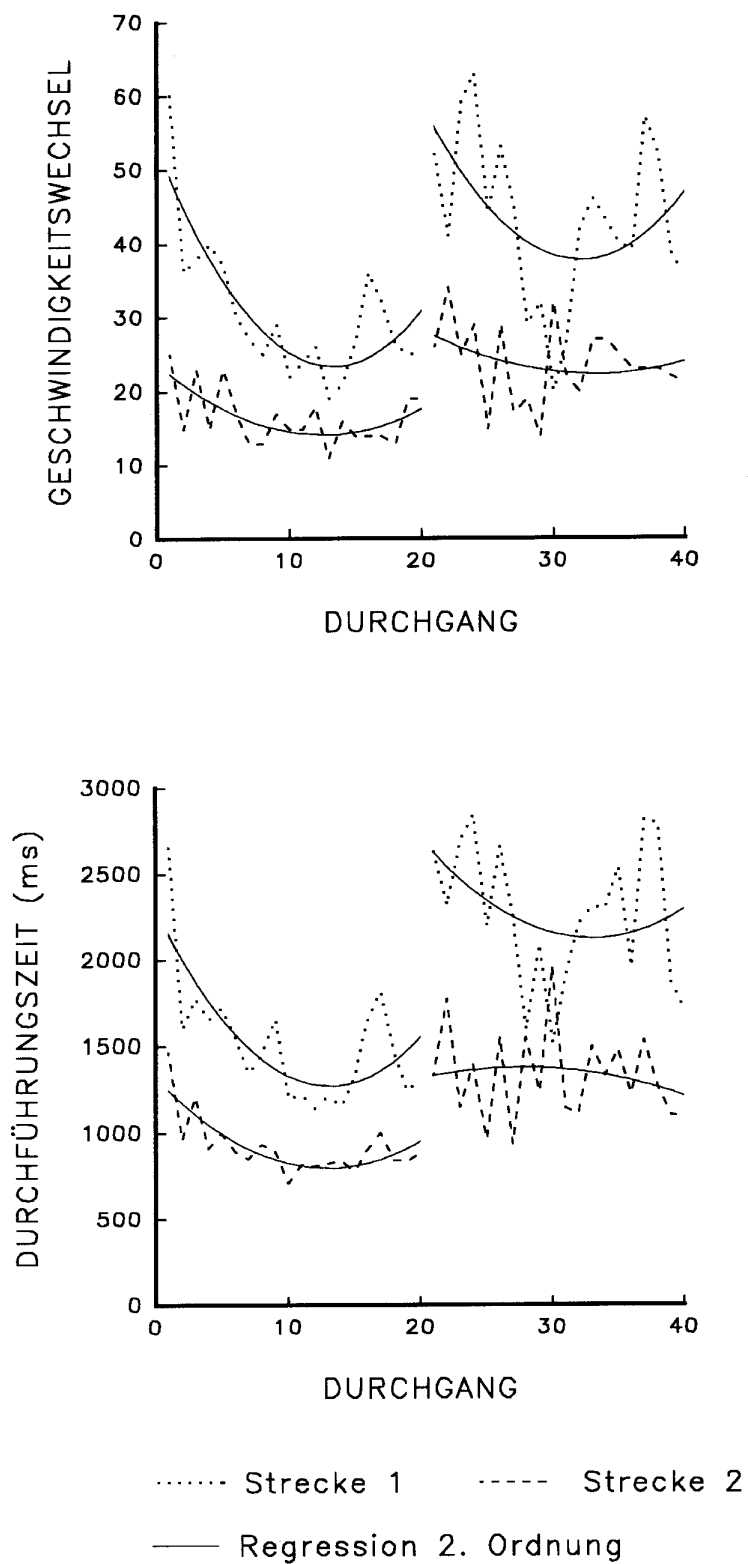


Abbildung 4.28: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (oben) und Durchführungszeiten (unten) im Übungsverlauf. **Patient TK** beginnt mit der linken Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur rechten Hand.

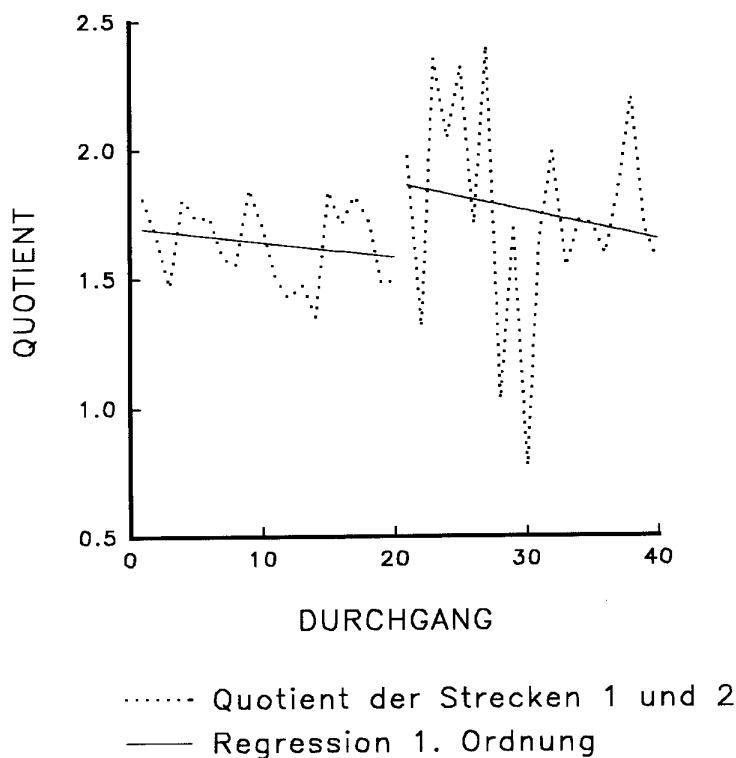


Abbildung 4.29: errechnete Quotienten der Durchführungszeiten im Übungsverlauf. **Patient TK** beginnt mit der linken Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur rechten Hand.

Neben einer geringen Reduktion der Quotienten beider Hände ohne nachweisbare Transfereffekte zeigt sich eine wesentlich höhere Variabilität der Werte der rechten Hand (Abb. 4.29). Der Vergleich der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile (Abb. 4.30 und 4.31) beider Hände weist (besonders im Durchgang 10) deutlich längere Durchführungszeiten und wesentlich mehr Richtungswechsel auf. Auch läßt sich bei kontinuierlicher Verbesserung der linken Hand erkennen, daß der Patient mit der rechten Hand kaum Verbesserungen erreicht.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Patient den kontralateralen Transfer von der linken zur rechten Hand zu diesem Zeitpunkt generell nicht nutzen kann. Über die Gründe für diesen Befund läßt sich nur spekulieren. Möglich wäre z.B. eine vorangegangene Läsion von Bahnen, die für den kontralateralen Transfer notwendig sind.

Obwohl der Patient nur über Feinmotorikstörungen klagte sind die Bewegungen beider Hände hinsichtlich der Automation gestört. Die kinematischen Ergebnisse unterstreichen in diesem Fall die Störung, da nicht nur die Kontrolle, sondern auch das Erlernen von Bewegungen der rechten Hand eingeschränkt ist.

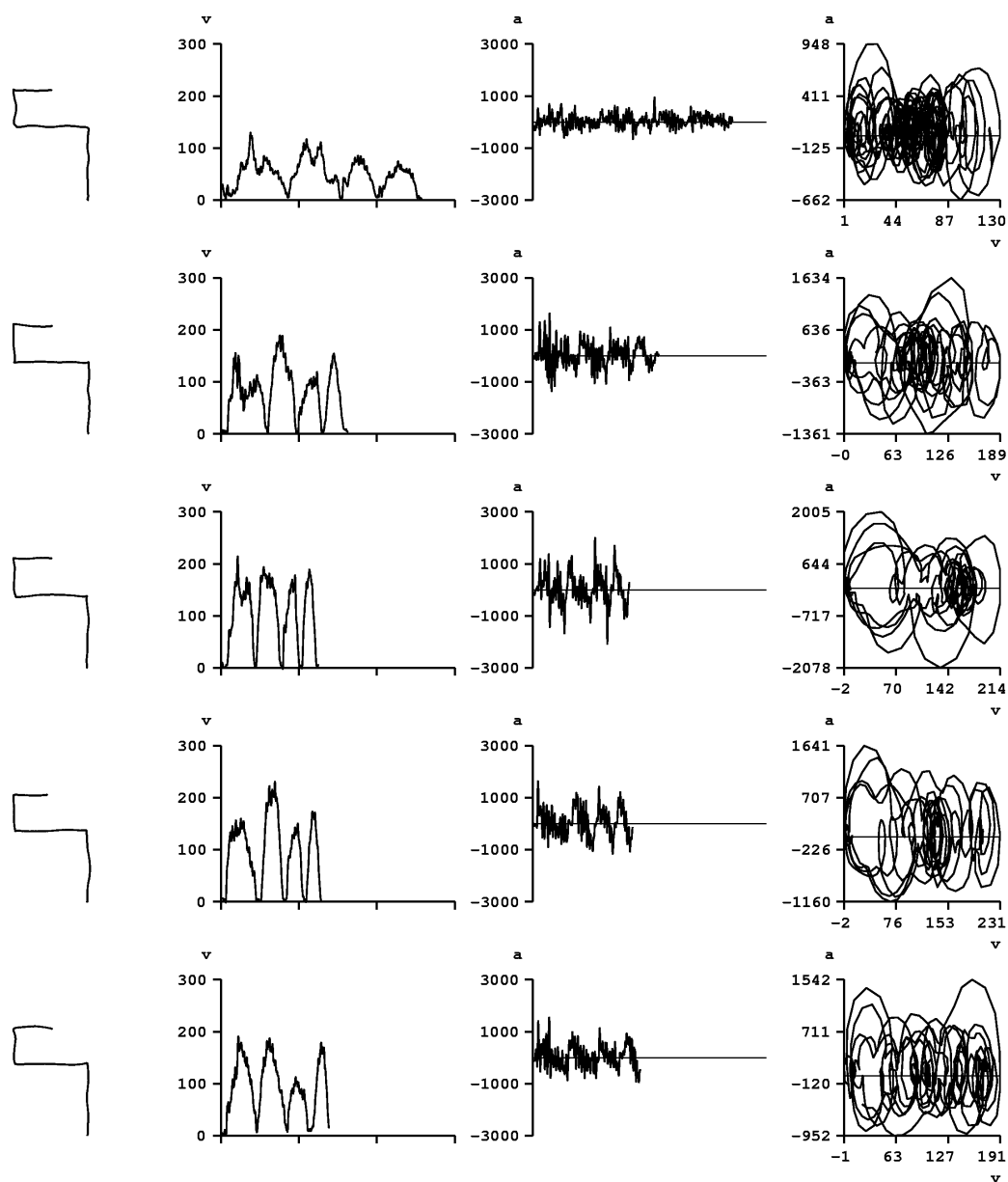


Abbildung 4.30: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der linken (ersten) Hand des **Patienten TK**.

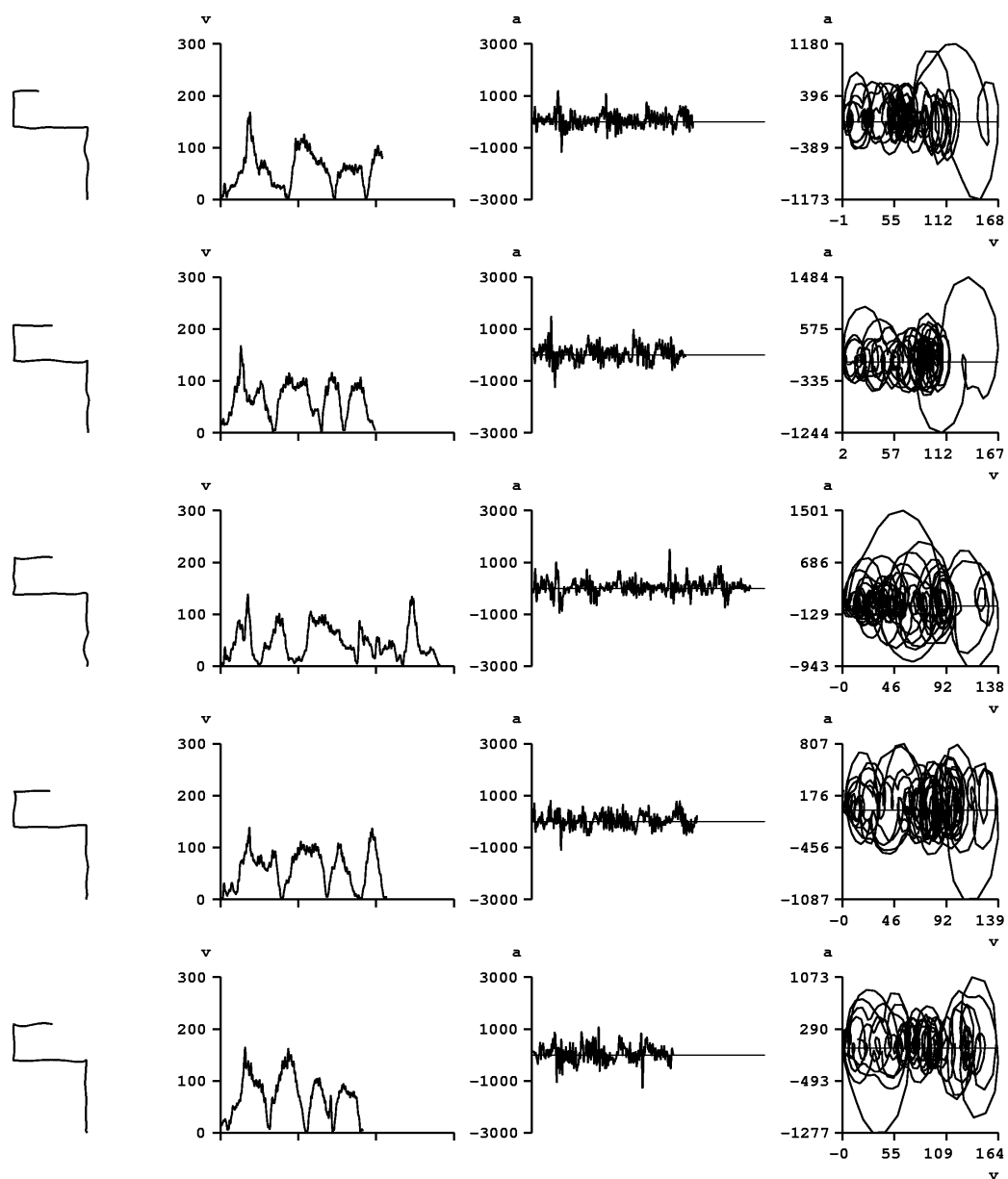


Abbildung 4.31: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der rechten (zweiten) Hand des **Patienten TK**.

Patient JB (25 Jahre) hatte sich bereits 6 Jahre vor der Untersuchung einer subtotalen Resektion eines links präzentral gelegenen Astrozytoms Grad II (WHO) unterzogen. Nach mehreren Bestrahlungen stellte sich der Patient mit einer erneuten leichten Hemiparese rechts und rezidierten Krampfanfällen vor. Es wurde eine weitere Reduktion des links zentralen Rezidivs eines, nunmehr als Grad III (WHO) eingestuften Astrozytoms, durchgeführt. Die Tumorresektion erstreckte sich auf den Gyrus frontalis superior links einschließlich des SMA. Ein Tumoranteil, der den linken Gyrus precentralis und z.T. auch Gyrus postcentralis infiltriert hatte, wurde aufgrund intraoperativ nachgewiesener motorischer Funktionen des rechten Arms, Beins und Gesichts belassen. Intraoperativ entstand trotzdem eine Plegie des rechten Fußes, die postoperativ weiter bestand. Die zusätzlich bestehende Hemiparese rechts ist postoperativ leicht rückläufig. Vor der Erkrankung war der Patient rechtshändig (Oldfield = 0.86). Er beginnt mit der linken Hand.

Der Patient erreicht deutliche Verbesserungen der linken Hand und der kurzen Strecke der rechten Hand hinsichtlich der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel und der Durchführungszeiten (Abb. 4.32). Transfereffekte sind für die kurze und weniger ausgeprägt auch für die lange Strecke zu erkennen.

Für beide Hände zeigt sich eine Abnahme des Quotienten (Abb. 4.33). Transfereffekte lassen sich hier jedoch nicht nachweisen. Das bedeutet, daß zwar beide Hemisphären eine zeitliche Organisation beginnen, die Übertragung von der rechten zur linken Hemisphäre aber nicht stattfindet.

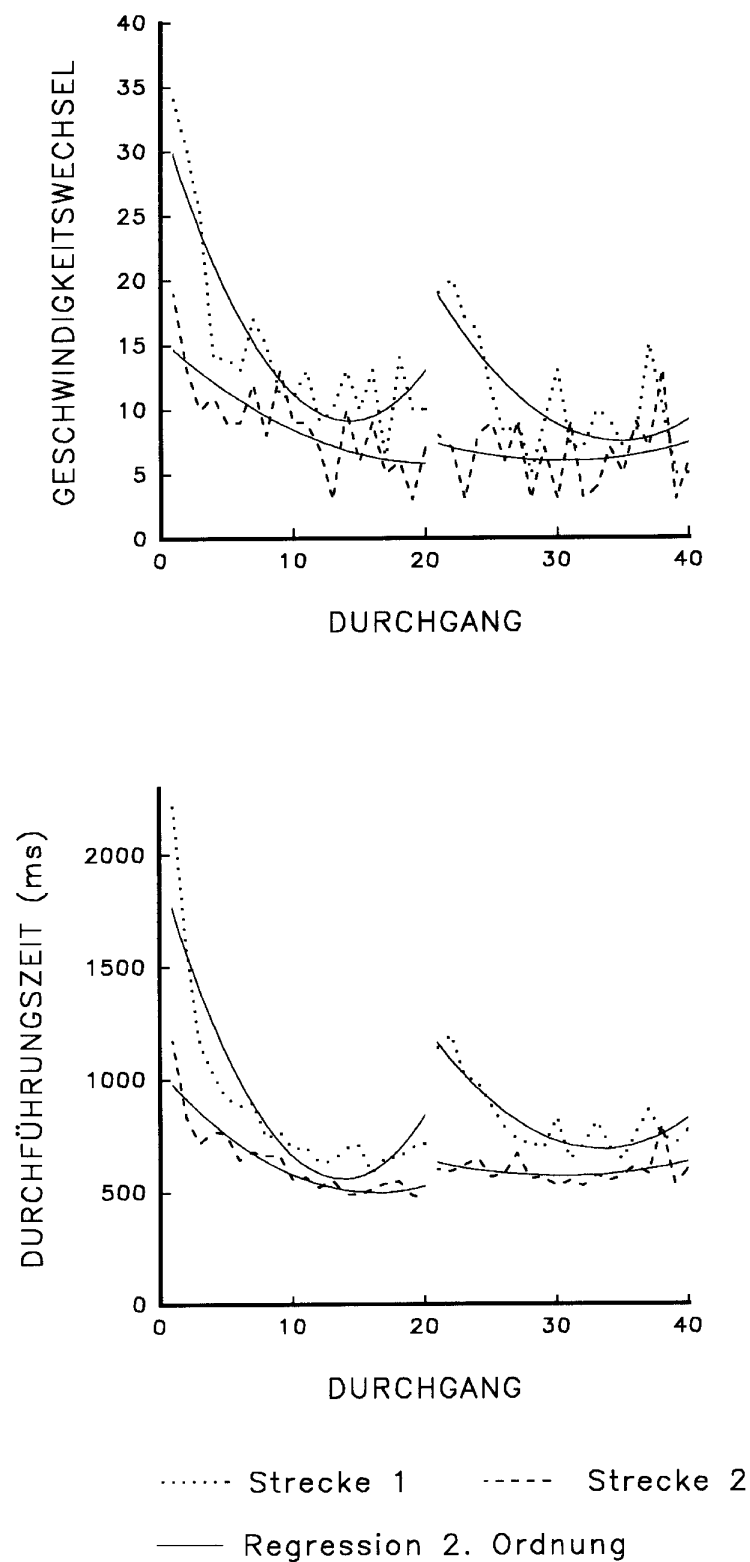


Abbildung 4.32: Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (oben) und Durchführungszeiten (unten) im Übungsverlauf. **Patient JB** beginnt mit der linken Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur rechten Hand.

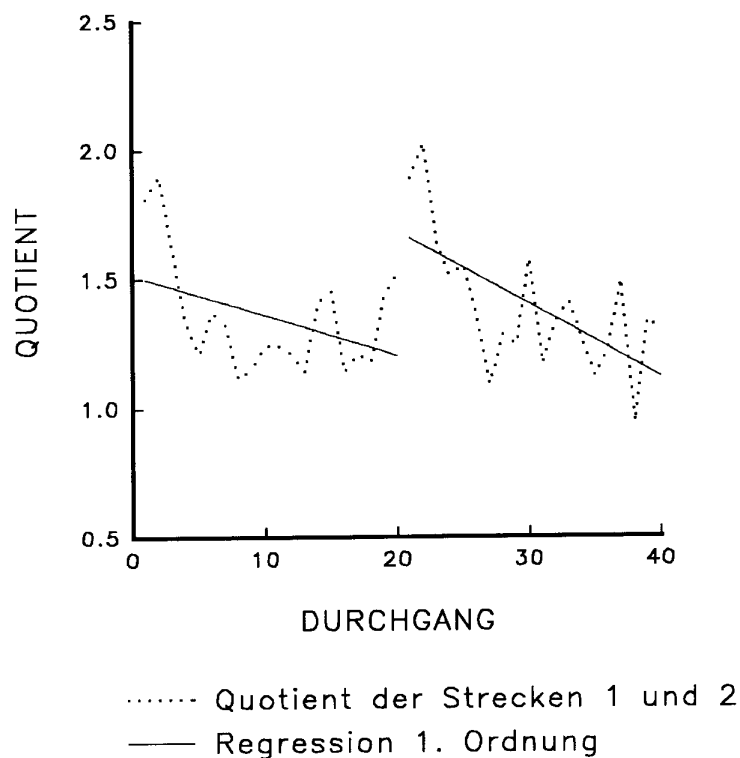


Abbildung 4.33: errechnete Quotienten der Durchführungszeiten im Übungsverlauf. **Patient JB** beginnt mit der linken Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur rechten Hand.

Im Gegensatz dazu benötigt der Patient mit der linken Hand (Abb. 4.34) anfangs relativ lange Durchführungszeiten für die einzelnen Strecken und hat sehr viele Inversionen im Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf. Ein entsprechend dichtes Bild zeigt sich für das Phasendiagramm. Im Verlauf der Übung macht der Patient jedoch sehr gute Fortschritte. Am Ende der Übung mit der linken Hand sind die Durchführungszeiten und Anzahl der Inversionen deutlich niedriger. Auch im Phasendiagramm läßt sich zunehmend die Form erahnen, die ein gesunder Proband nach ausreichender Übung produziert.

Mit der rechten (zweiten) Hand sind anfangs noch einige Wechsel in der Geschwindigkeitskurve zu erkennen, die im Übungsverlauf rasch reduziert werden. Die Kurven der Geschwindigkeitsdarstellung werden zunehmend schlanker, im Beschleunigungsverlauf sind aber noch Inversionen zu erkennen. Parallel dazu wird auch das Phasendiagramm übersichtlicher.

Interessant ist, daß sich die bloßen Bewegungsspuren kaum unterschieden. Das motorische Lernen und der kontralaterale Transfer sind trotz der motorischen Beeinträchtigung gut erhalten und könnten im Rahmen des Trainings genutzt werden.

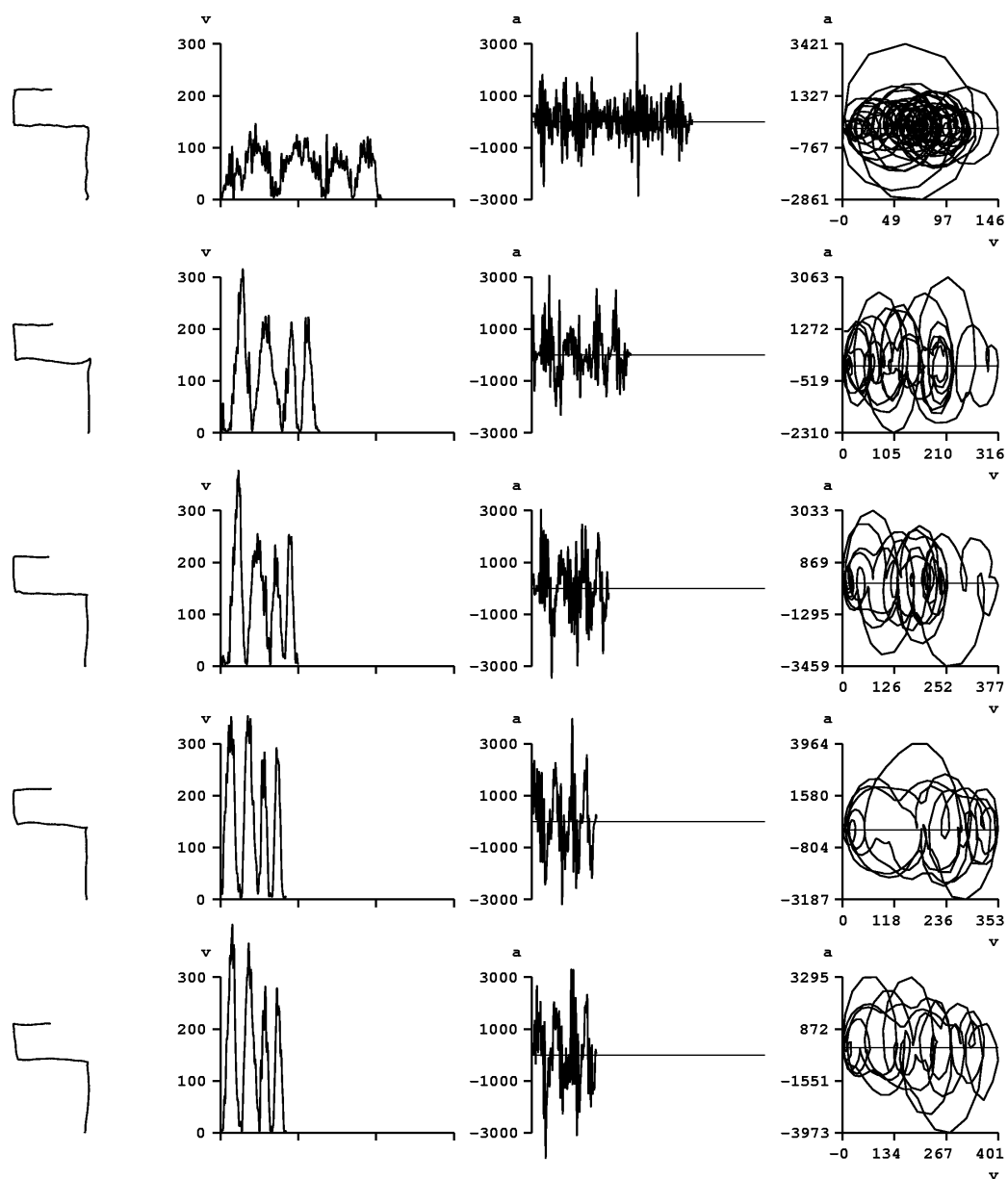


Abbildung 4.34: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der linken Hand des **Patienten JB**.

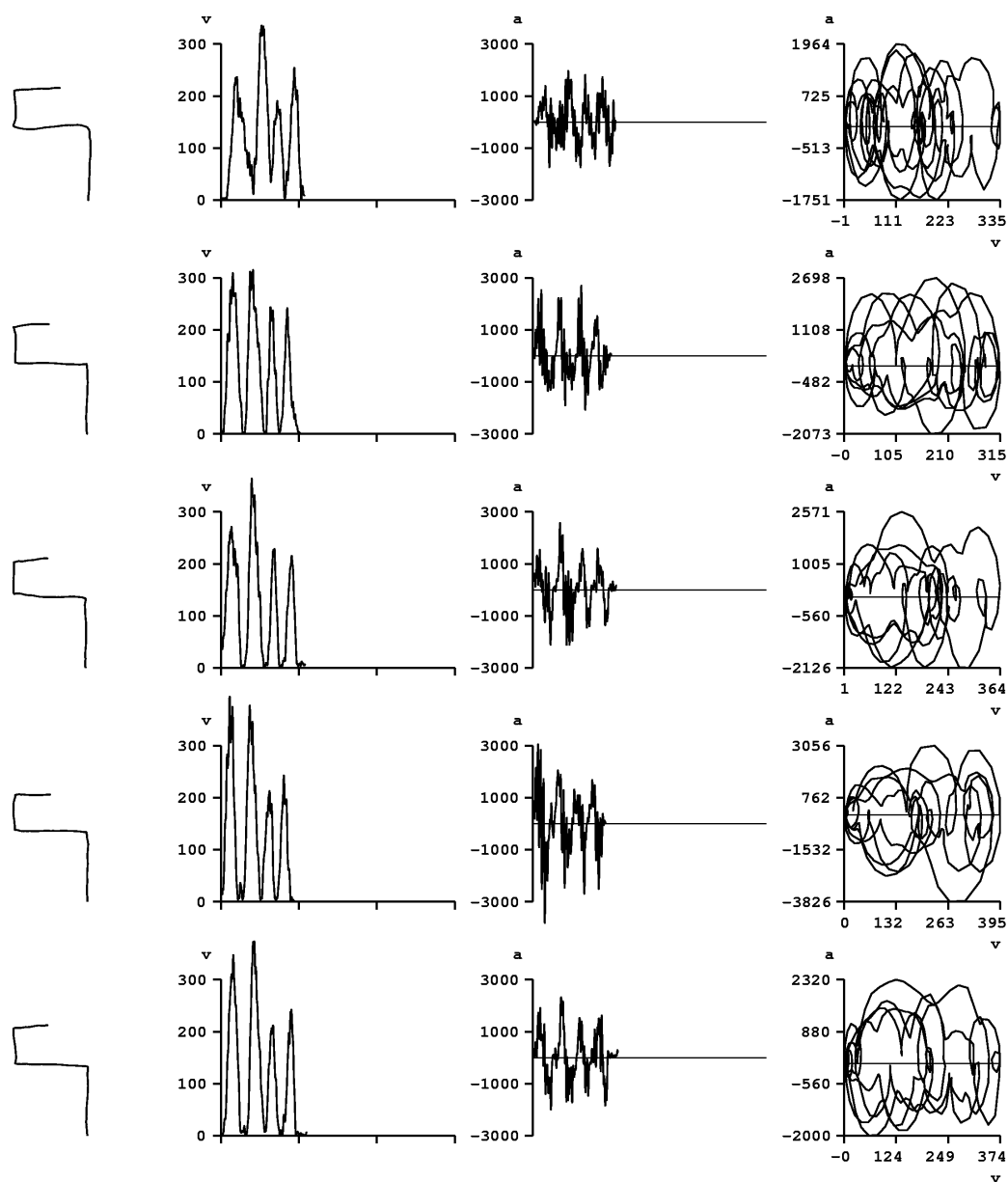


Abbildung 4.35: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der rechten Hand des **Patienten JB**.

Patientin AS (56 Jahre) war bereits 10 Monate vor der Untersuchung an einem Astrozytom Grad II-III (WHO) rechts präzentral operiert worden. Zuletzt wurde aufgrund eines nun zentral gelegenen Rezidivs eine Tumorreduktion unter intraoperativem Sprach- und Motorikmonitoring durchgeführt. Tumoranteile, die im Gyrus praecentralis und postcentralis gelegen waren wurden in Anbetracht des zu erwartenden motorischen Defizits belassen. Vorgestellt hatte sich die Patientin präoperativ aufgrund erneut aufgetretener Krampfanfälle.

Sie hat zum Zeitpunkt der Untersuchung eine Hemiparese links mit proximal betonter Parese des Arms und einer Feinmotorikstörung der linken Hand. Die Patientin ist Rechtshänderin (Oldfield = 1.00). Sie beginnt mit der rechten Hand.

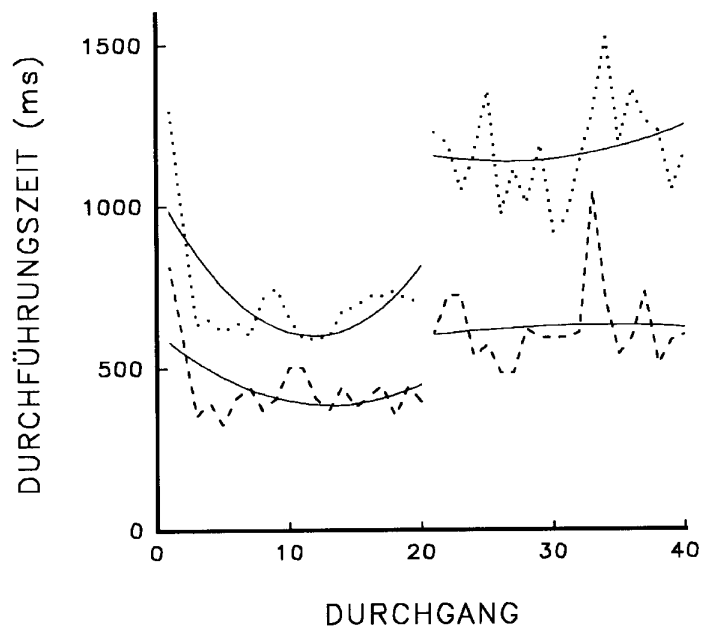
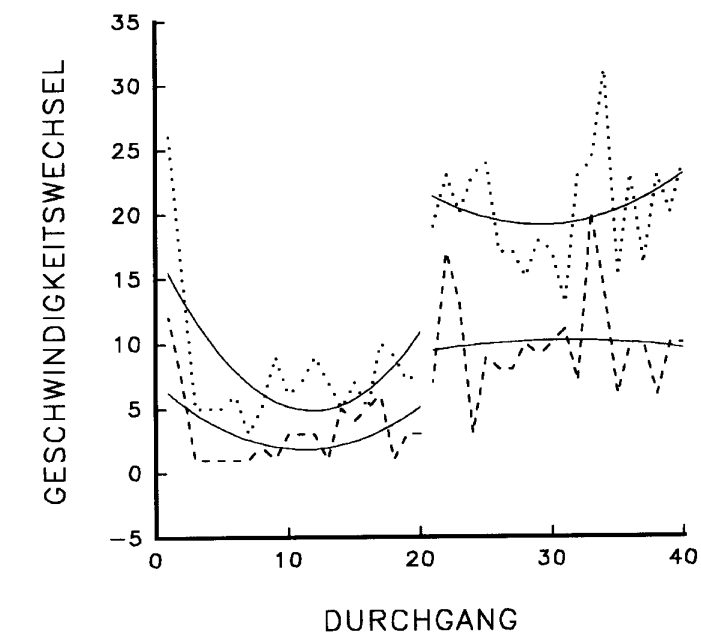
Mit der rechten Hand erreicht die Patientin rasch eine Reduktion der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel und der Durchführungszeiten, die für die linke Hand nicht nachweisbar ist (Abb. 4.36).

An den Werten der linken Hand sind im Übungsverlauf weder Transfereffekte noch eine Verkürzung der Bewegungszeiten oder eine Reduktion der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel nachzuweisen. Die Werte sind vergleichbar den Ausgangswerten der rechten Hand und weisen eine wesentlich höhere Variabilität auf.

Auffallend sind auch die Unterschiede der Leistung bezüglich der Streckenlänge. Die Patientin hat offenbar mit der linken Hand deutlich mehr Schwierigkeiten die lange Strecke zu bewältigen.

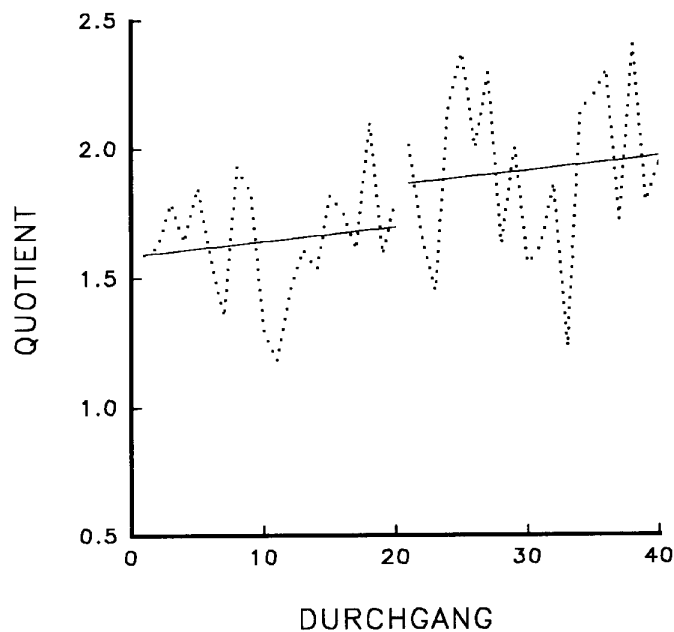
Dementsprechend nimmt das anfangs relativ gute Zeitverhältnis der Strecken im Übungsverlauf beider Hände zu (Abb. 4.37). Das heißt, daß sie die Verkürzung der Bewegungszeit der Strecke 2 (kurze Strecke) in Strecke 1 nicht im selben Maße erreicht wird.

Offenbar ist die längere, räumlich anspruchsvollere Strecke für die Patientin schwieriger zu bewältigen und läßt keine Verbesserung zu. Dies neben der proximalbetonten Parese könnte mit der rechtshemisphärischen Läsion durch den Tumor und den operativen Eingriff in Zusammenhang stehen.



..... Strecke 1 ----- Strecke 2
 — Regression 2. Ordnung

Abbildung 4.36: die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel (oben) und die Durchführungszeiten (unten) im Übungsverlauf. **Patientin AS** beginnt mit der rechten Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur linken Hand.



..... Quotient der Strecken 1 und 2
 — Regression 1. Ordnung

Abbildung 4.37: errechnete Quotienten der Durchführungszeiten im Übungsverlauf. **Patientin AS** beginnt mit der rechten Hand und wechselt nach 20 Durchgängen zur linken Hand.

An der Schriftspur ist die Unsicherheit der linken Hand (Abb. 4.28) und anfangs auch der rechten Hand (Abb. 4.27) deutlich zu erkennen. Im Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil der linken Hand sind relativ viele Richtungswechsel vorhanden, wie sie für bewußt kontrollierte oder gestörte Bewegungen typisch sind. Die anfänglich langen Durchführungszeiten der rechten Hand werden im Verlauf der Übung rasch reduziert. Entsprechend erhöht sich die Maximalgeschwindigkeit. Dagegen zeigt sich für die linke Hand ein nur geringer Fortschritt. Die Geschwindigkeitsprofile werden etwas schlanker und das Nachzeichnen kann zunehmend ohne Verzögerung nach dem Aufsetzen des Stifts begonnen werden. Im Vergleich zur rechten Hand sind aber noch deutliche Defizite zu erkennen. Im Gegensatz zur linken Hand ist das Phasendiagramm der rechten Hand schon im 5. Versuch dem der gesunden Probanden relativ ähnlich.

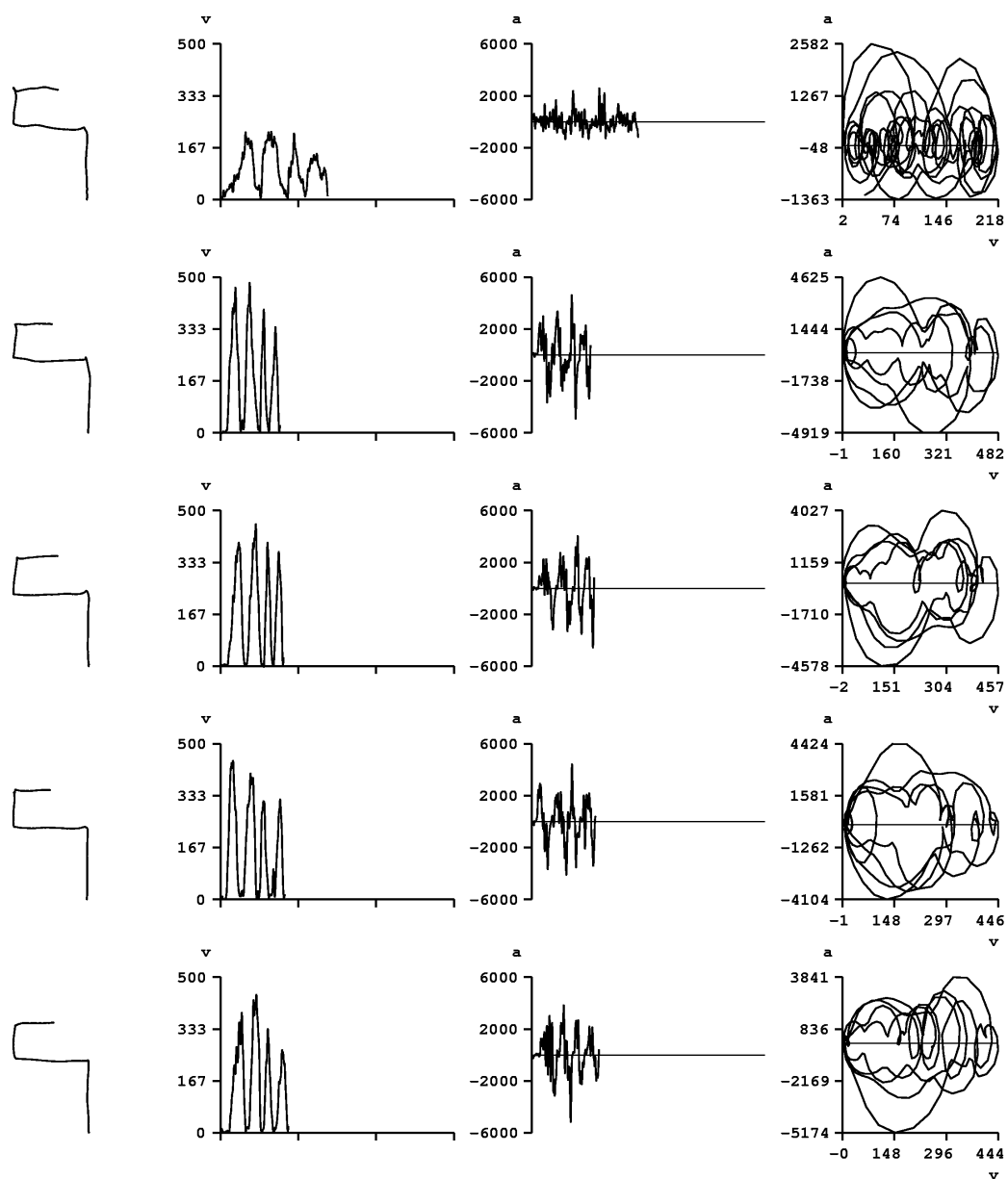


Abbildung 4.38: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der rechten Hand der **Patientin AS**.

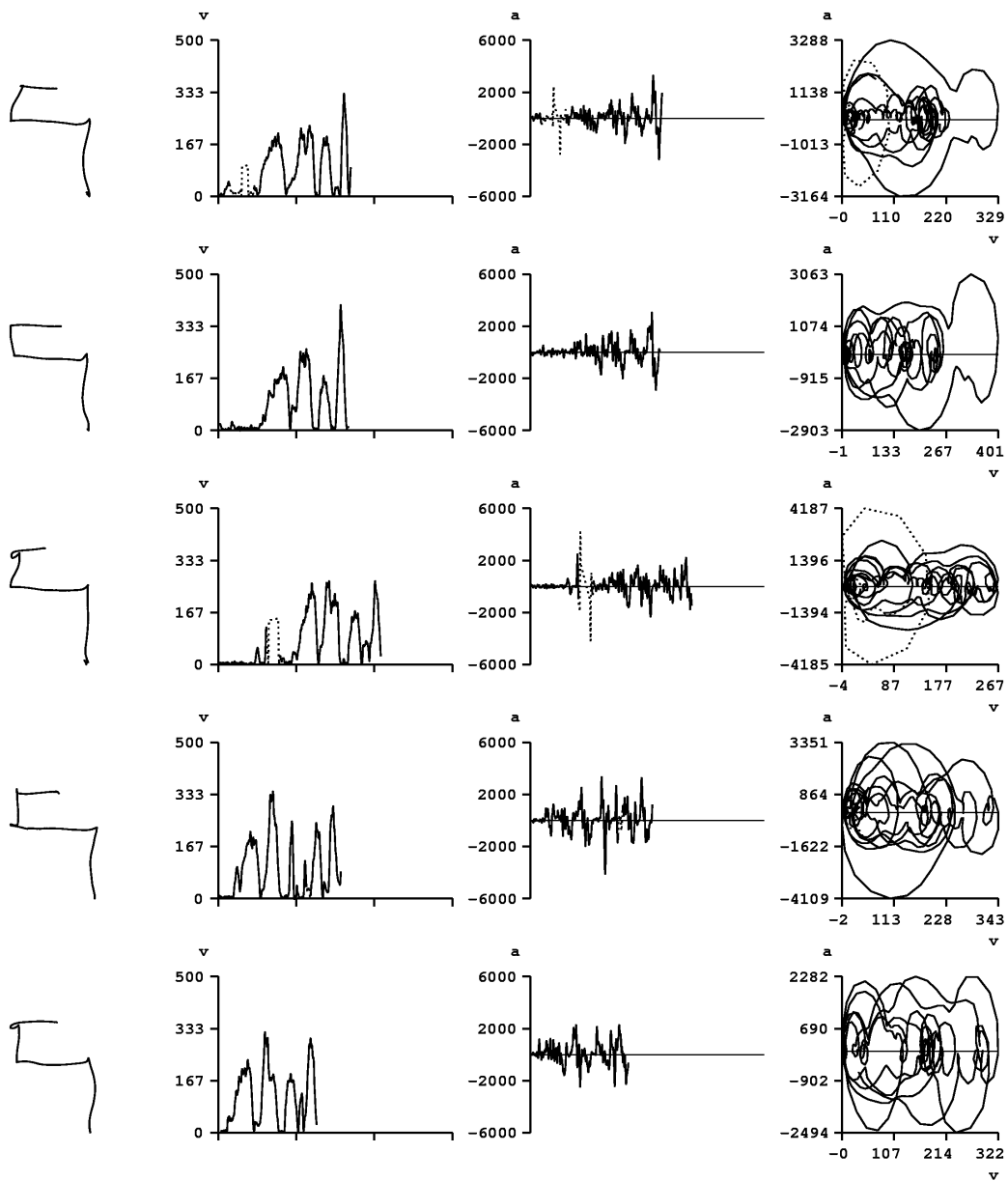


Abbildung 4.39: Bewegungsspur, Geschwindigkeitsverlauf, Beschleunigungsverlauf und Phasendiagramm von Geschwindigkeit und Beschleunigung: von links nach rechts. Dargestellt sind von oben nach unten die Durchgänge 1, 5, 10, 15 und 20 der linken Hand der **Patientin AS**.

Zusammenfassung der Patientenbeispiele

Die beschriebenen Patienten wurden ausgewählt um verschiedene motorische Störungen zu zeigen. Darüber hinaus wird durch die Patientenbeispiele anschaulich dargestellt, daß erst durch die kinematische Analyse die gestörten und erhaltenen Komponenten der motorischen Kontrolle und des motorischen Lernens differenziert und das Ausmaß der Störung beurteilt werden kann.

Patient TK wieß klinisch lediglich eine Feinmotorikstörung und eine passagere Bewegungs- und Sprachstörung auf. Die kinematische Analyse belegt jedoch nach Tumorentfernung im medialen prämotorischen (SMA) und motorischen Cortex neben einer höheren Variabilität der Bewegungen, daß das motorische Lernen und der Transfer sehr eingeschränkt sind. Hier zeigt die kinematische Analyse eine wesentlich umfassendere Störung auf als klinisch vermutet worden war. Der Befund ist vereinbar mit einer Läsion des linken SMA hinsichtlich der Beeinträchtigung des motorischen Lernens (präSMA) und der Bedeutung des linken SMA für die effektorunabhängige Planung eines Bewegungsablaufs (Grafton et al. 2002).

Bei Patientin AS besteht nach Tumorreduktion im rechten prämotorischen und motorischen Cortex bei gesunder rechter Hand eine der klinischen Hemiparese entsprechende kinematische Störung der linken Hand.

Patient JB zeigt eine differenzierte Bewegungsstörung. Der Transfer der Bewegungszeiten und der beginnenden Automatisierung ist bei einer klinisch deutlichen Hemiparese rechts erhalten. Obwohl beide Hemisphären ein relatives Timing der Bewegungszeiten zueinander beginnen kann dieses nicht übertragen werden. Insofern kann man vermuten, daß die Störung weniger durch eine Läsion des SMA sondern eher der zahlreichen verbindenden Bahnen zwischen den SMA (Rouiller et al. 1994) zu erklären ist.

Patientin EG dagegen wurde ausgewählt, da sie neben einer klinisch noch ausgeprägten Parese und einer deutlich erkennbaren peripheren Bewegungsstörung ein zentral gut organisiertes Timing der Bewegung aufwies sowie schnelles motorisches Lernen mit gutem Transfer des Timing der Bewegung. Hier bietet sich an das erhaltene Timing zum Ausgangspunkt des Training zu machen und die Transfereffekte zu nutzen.

4. Diskussion

Für die Einschätzung einer Bewegungsstörung ist es entscheidend, automatisierte von deautomatisierten gestörten oder bewußt kontrollierten Bewegungsabläufen zu unterscheiden. Die notwendige Differenzierung automatisierter von nicht automatisierten Bewegungen wird erst durch die Analyse kinematischer Parametern möglich (Mai und Marquardt 1995). Wichtig ist in diesem Zusammenhang, daß bei Patienten mit Hirnschädigung nicht nur durch ein tatsächliches motorisches Defizit im engeren Sinn wie z.B. eine Parese die Durchführung einer Bewegung erschwert wird, sondern auch als Folge der primären Störung eine bewußte Kontrolle der Bewegungen die Deautomatisierung fördert und somit die Bewegungsdurchführung sekundär zusätzlich behindern kann. Neben der Beschreibung der tatsächlichen Störung ist es aufgrund der unterschiedlichen Störungsmuster für die Therapie wichtig, nach erhaltenen automatisierten Bewegungen zu suchen.

Die für die Übung einer motorischen Aufgabe typische Verkürzung der Bewegungszeit war in Form einer Lernkurve für Experiment 1 ohne erkennbare Gruppenunterschiede zu belegen. Im zweiten Experiment konnten zunehmend weniger Verbesserungen hinsichtlich der Durchführungszeit gezeigt werden. Das ist sicher zum Teil auf die zunehmende Komplexität der Bewegung zurückzuführen. Zum anderen veränderte sich die Durchführungszeit nach einiger Übung nur mehr wenig und näherte sich nahezu asymptotisch an einen bestimmten Wert an, ein für eine Lernkurve typischer Verlauf. Dieses Phänomen wurde von Schmidt (1988) 'floor' Effekt (Boden Effekt) genannt, und bedeutet, daß die Aussagekraft des Parameters für die vorliegende Aufgabe begrenzt ist, da dieser keinen weiteren Lernerfolg zeigen kann, auch wenn er stattfindet. Daher ist die Durchführungszeit ein sinnvoller Parameter zur Operationalisierung von motorischem Lernen, dessen Bereich jedoch begrenzt ist. Darüber hinaus gibt eine erhöhte Durchführungszeit zwar einen Hinweis darauf, daß ein motorisches Defizit besteht, läßt allein jedoch kaum genauere Aussagen über deren Ursachen zu, da sie als unspezifisches Zeichen bei sehr unterschiedlichen Bewegungsstörungen auftreten kann.

Insbesondere gegen Ende der Übungsserie bestanden große interindividuelle Unterschiede in den Durchführungszeiten. Obwohl die Bewegungen auf Aufforderung durchaus auch schneller oder langsamer durchgeführt werden konnten, schien es, als verwendeten die Probanden eine bevorzugte Durchführungszeit. Ähnliche Ergebnisse wurden in Arbeiten von Freund (1986) und Kunesch et al. (1989) dargestellt. Mögliche Gründe dafür könnten die physiologische Nervenleitgeschwindigkeit und die Nutzung des Dehnungsreflexes sein. Für bestimmte hochüberlernte Bewegungen wurden Strukturen zumeist im Hirnstamm identifiziert, die die Frequenz rhythmischer Bewegungen wie Hüpfen mit etwa 2 Hz oder bestimmte Handbewegungen mit etwa 5 Hz generieren (Cohen et al. 1988). In diesem Zusammenhang könnte die Eigenfrequenz interner Oszillatoren (Llinas 1988) eine wesentliche Rolle spielen, deren Frequenzen den Typ II Bewegungen und dem physiologischen Handtremor (6-12 Hz) sehr ähnlich sind (Freund 1986). Auffallend war eine deutlich schlechtere Leistung der linken Hand hinsichtlich der Bewegungszeiten in Gruppe 1 in der ersten Strecke der Figur 2, die sich ebenso nicht leicht erklären läßt. Eine mögliche Ursache könnte die ungewöhnliche Bewegungsrichtung nach links unten darstellen, die auch von einigen Probanden spontan als schwieriger eingeschätzt wurde. Unklar bleibt jedoch weshalb dieser Effekt in Gruppe 2 nicht auftrat.

Zusätzlich war jedoch, im Gegensatz zur ersten Gruppe, in Gruppe 2 die rechte Hand am Anfang des zweiten Übungsblocks durch den bestehenden Transfer (aus vorangegangener Übung) im Vorteil. Die Transfereffekte dagegen waren in der zweiten Gruppe nicht deutlicher ausgeprägt.

Transfereffekte

Trotz deutlicher individueller Unterschiede waren für die Gruppen starke Transfereffekte hinsichtlich der Bewegungszeiten und der Geschwindigkeitswechsel in beiden Experimenten nachweisbar, die jedoch mit zunehmender Komplexität der Figuren abnahmen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen einer Untersuchung von Halsband (1992).

Im Hinblick auf die ausgedehnte Diskussion über die Hemisphärenspezialisierung wäre es vermessen die bessere Transferleistung von der linken auf die rechte Hand einem einzigen Grund zuzuschreiben. Unter der Annahme einer bevorzugten Transferrichtung in Abhängigkeit von der Bewegungsamplitude wäre jedoch die bessere Leistung der zweiten Gruppe aufgrund der räumlichen Aspekte dieser Aufgabe durchaus zu erklären.

Puretz (1983) konnte ebenfalls einen besseren Transfer von komplexen Tanzbewegungen von der linken zur rechten Körperhälfte zeigen. Eine plausible Erklärung dafür könnte die bessere Übertragung von motorischen Programmen durch effektivere Programmierung räumlicher Aufgaben von der rechten Hemisphäre aus sein. Demgegenüber konnte Halsband (1992) an wenig räumlichen Schreibbewegungen Transfereffekte nahezu ausschließlich von der rechten zur linken Hand nachweisen und schloß daraus, daß die etablierten Motorprogramme besser von der linken zur rechten Hemisphäre generalisiert werden. Auch die Tatsache, daß für die linke (zweite) Hand in Gruppe 1 trotz nachweisbarer Transfereffekte in keiner der Figuren wesentliche Verbesserungen nachweisbar waren, könnte ein Hinweis dafür sein. Inwieweit diese Effekte durch die Rechtshändigkeit der Probanden und die Auswahl der Figur beeinflusst wurden, ist aus den vorgestellten Daten kaum abzuschätzen. Hinsichtlich des Transfers scheint die 'representational switch hypothesis' von Bedeutung zu sein, die die Verlagerung der Hirnaktivität im Lernverlauf beschreibt. Es besteht eine eher abstrakte, wenig effektorabhängige Repräsentation in der frühen Lernphase und eine zunehmend spezifische Repräsentation in späteren Lernphasen (Bapi et al. 2000, Park und Shea 2003). Räumlich erfolgt die Zusammensetzen abstrakter Repräsentationen des parietalen Cortex (Grafton et al. 1998) im SMA und CMA (Leuthold und Jentzsch 2001), die effektorspezifische Repräsentationen einer Bewegung werden dagegen im primären sensomotorischen Cortex (Grafton et al. 1998, Leuthold und Jentzsch 2001) und im lateralen prämotorischen Cortex (Muellbacher et al. 2001) gespeichert. Parallel zu der Verwandlung schnell erworbener visuell-räumlicher Koordinaten in langsam erworbene körperzentrierter Motorkoordinaten wird die Bewegung mit fortgesetzter Übung zunehmender effektorspezifisch.

In Bezug auf den kontralateralen Transfer ließ sich zeigen, daß das schnell erworbene Timing einer Bewegung leicht transferiert wird (Teixeira 2000), die effektorspezifische Kontrolle der Kraft dagegen weniger effektiv transferiert werden konnte (Teixeira 2000). Das würde bedeuten, daß mit fortgesetzter Übung der zunehmend effektorspezifischen Bewegungen die Transfereffekte abnehmen. Zusätzlich scheint auch die Endpunktposition eher von der rechten zur linken Hemisphäre, die Bewegungskordinaten (z.B. Richtung) dagegen eher von der linken auf die rechte Hemisphäre übertragen zu werden (Sainsburg 2002). Eine Erklärung hierfür könnte sein, daß diese Anteile der Bewegungskontrolle von der spezialisierten Hemisphäre aus besser übertragen werden (Sainsburg 2002).

Transfereffekte sind als übergeordneter Indikator geeignet, um Verbesserungen verschiedener anderer Parameter einem tatsächlichen Lernerfolg zuzuschreiben. Durch die kontralaterale Reproduzierbarkeit als überprüfbare Form des Behaltens werden Performancevariablen zu Lernvariablen (Schmidt 1988). Der Transfer von Erlerntem sollte erst als positiv bezeichnet werden, wenn sich neben einer vorangegangenen Leistungsverbesserung sowohl die jeweils ersten Durchgänge der Übungsblöcke als auch die Durchgänge beim Übergang von der ersten auf die zweite Hand ohne wesentliche Leistungsverluste darstellen.

Da eine Leistungsverbesserung des jeweiligen Parameters bei der Übung der einen Körperhälfte Voraussetzung für den Nachweis von kontralateralen Transfereffekten ist wurden einzelne Probanden von der Auswertung ausgeschlossen, da im ersten Übungsblock keine Verbesserung der Parameter nachweisbar war. Bei diesen Probanden wäre in Folge dessen auch keine sinnvolle Untersuchung zum Transfer möglich gewesen. Anzunehmen ist, daß sich auch bei diesen Probanden nach längerer Übung Fortschritte zeigen ließen. Gründe für diese interindividuellen Leistungsunterschiede dürfte neben einem wahrscheinlich unterschiedlich effizienten Lernverhalten auch das Aufmerksamkeits- und Motivationsniveau der Probanden sein. Insofern wäre es möglicherweise sinnvoll, im Rahmen der motorischen Untersuchung des Transfers begleitend auch das Maß der Aufmerksamkeit zu erfassen.

Da Transfereffekte leicht zu unterdrücken sind, wie Hicks et al. (1982) in einem bestechend einfachen Experiment zeigten, kann man aus deren Abwesenheit nicht schließen, daß ein Proband diese generell nicht produzieren oder nutzen kann.

Automatisierung einer Bewegung

Bei ungeübten Bewegungen entstehen Unregelmäßigkeiten im Geschwindigkeitsverlauf, also eine Art Segmentierung der Bewegung, die, wie z.B. bei einer Geraden, nicht von der Figur vorgegeben ist.

Man kann sich diese Geschwindigkeitswechsel als Unregelmäßigkeiten im Geschwindigkeitsverlauf durch wiederholte Korrekturbewegungen oder Feedbackschleifen, also den wiederholten Abgleich der stattfindenden Bewegung mit der geplanten Bewegung vorstellen (Milner und Ijaz 1990). Diese Korrekturbewegungen beeinflussen ganz wesentlich die Durchführungszeit. Hinsichtlich der Geschwindigkeitswechsel ist eine Bewegung als optimal anzusehen, wenn sie "single-peaked" (eingipfelig) ist, also keine Korrekturbewegungen mehr notwendig sind (Plamondon 1991, Mai und Marquardt 1995). Milner (1992) hält diese Segmentierung einer Bewegung für eine Strategie des motorischen Lernens, wobei die einzelnen Segmente einen Annäherungsversuch darstellen, der nach ausreichender Übung in eine glatte automatisierte Bewegung übergeht.

Die Anzahl der Wechsel im Geschwindigkeitswechsel hat sich als übersichtlicher und sensibler Parameter zur Erfassung des motorischen Lernens erwiesen, da sich ein tatsächlicher Lernerfolg im Sinne der Automation der Bewegung ableiten läßt.

Bei anfänglich großen interindividuellen Unterschieden war, wie für die Bewegungszeiten, eine klare Reduktion der Anzahl der Geschwindigkeitswechsel festzustellen. In beiden Experimenten konnte eine angehende Automation der Bewegungen gezeigt werden. Wie für die Bewegungszeiten war die Abnahme der Geschwindigkeitswechsel jedoch für Gruppe 1 mit der linken (zweiten) Hand schwächer. Ebenso stellten sich in

Gruppe 1 mit der linken Hand in Strecke 1 der zweiten Figur deutlich mehr Wechsel im Geschwindigkeitsverlauf dar.

Auch für die Geschwindigkeitswechsel ließ sich ein geringer Vorteil von Gruppe 2 verzeichnen. Neben der möglicherweise günstigeren Transferrichtung für diese Aufgabe traten diese Unterschiede zum Teil jedoch auch im Vergleich der Übungsserie der linken Hand auf, bei der man (durch Transfereffekte) eher einen Vorteil der ersten Gruppe erwarten würde. Diese Unterschiede müssen aufgrund der Reihenfolge vorbestehend sein und können am ehesten mit einer effektiveren Verarbeitung räumlicher Bewegungen durch die rechte Hemisphäre erklärt werden.

Die beschriebenen Gruppenergebnisse ähneln in ihrer Aussage den Ergebnissen der Bewegungszeiten. Ein eingipfeliges Geschwindigkeitsprofil stellt jedoch keinen floor-effect dar, sondern ist das Ergebnis einer in Bezug auf die Aufgabenstellung optimiert durchgeführten Bewegung. Im Gegensatz zur Durchführungszeit als Performancevariable kommt den Geschwindigkeitswechseln durch die Darstellung der Automatisierung vermutlich im Zusammenhang mit weiteren kinematischen Parametern die Bedeutung einer Lernvariablen zu.

In Experiment 1 wurden die positiven Transfereffekte indirekt durch die Gruppenunterschiede (Reihenfolgeeffekte) bestätigt, da die zweite Hand jeder Gruppe am Anfang des zweiten Übungsblocks mit einem deutlich Vorteil begann, der jedoch am Ende des Übungsblocks nicht mehr zu verzeichnen war.

Für das Experiment 2 ließen sich, wie für die Bewegungszeiten, auch für die Geschwindigkeitswechsel darüber hinaus jedoch auch nicht erwartete Gruppenunterschiede zeigen, wobei die zweite Gruppe mit der zweiten bzw. mit der rechten Hand auch noch am Ende des Übungsblocks eine bessere Leistung bot. Dies könnte, wie oben erwähnt, ein möglicher Hinweis auf eine bevorzugte Transferrichtung von der linken zur rechten Hand bezüglich des weiteren Lernverhaltens in einer eher räumlichen Aufgabe sein Puretz (1983).

Der Vergleich der Leistung beider Hände ist allerdings insofern mit Vorsicht zu betrachten, als die Bewegungen der dargestellten Figuren in Bezug auf die Bewegungsrichtung mit dem linken und rechten Arm durch unterschiedliche

Muskelgruppen und Gelenke durchgeführt wird. Insofern sollte für weitere Studien eine zusätzliche spiegelverkehrte Figur eingesetzt werden. Es konnte jedoch auch an Rechtshändern bei identischen Wörtern und Malfiguren eine vermehrte Verwendung proximaler Muskelgruppen am linken Arm im Vergleich zum rechten Arm gezeigt werden (Mack et al. 1993).

Korrelation der Bewegungszeiten und Geschwindigkeitswechsel

Die Korrelation der Anzahl der Richtungswechsel im Geschwindigkeitsprofil und der Durchführungszeit war in beiden Experimenten sehr hoch.

Im klinischen Einsatz ist es vermutlich nicht notwendig, die genannte Korrelation zu erstellen, da sich keine zusätzlichen relevanten Informationen daraus ergeben. Wie oben erwähnt ist die flüssige automatisierte Ausführung einer Bewegung für den Alltag sicher wichtiger als die tatsächliche Durchführungszeit. Anders ausgedrückt stellt sich die Verkürzung der Durchführungszeit vermutlich als Folge der Reduktion des Zeitaufwandes bei der zentralen Planung einer Bewegung im Zuge der Automation einer Bewegung von selbst ein.

In einer Untersuchung von Sobizack (1992) stellte sich heraus, daß im Bereich von Durchführungszeiten unter 1000 ms die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel einen verlässlichen Indikator für die Automation einer Bewegung darstellt.

Konstante Figurzeit

Überraschend waren die Ergebnisse der Untersuchung der konstanten Figurzeit.

Hypothese war die Entstehung einer Isochronie der Bewegungsabschnitte (Freund und Büdingen 1978), also die Abkoppelung der Durchführungszeit von der Bewegungsamplitude, so daß für unterschiedlich lange Bewegungsabschnitte eine etwa gleiche Durchführungszeit benötigt würde. Die dazu notwendige Abnahme des Quotienten konnte nur für einzelne Streckenpaare weniger Probanden gezeigt werden, wie z.B. an Proband SU gut zu erkennen ist.

Wie zu erwarten, benötigten die Probanden für die jeweils längere Strecke anfangs deutlich mehr Zeit. Eine mit zunehmender Übung entstehende Isochronie ließ sich jedoch innerhalb der Gruppen bei sehr inhomogenen Ergebnissen nicht nachweisen. Auch die Annahme, daß sich dieses Prinzip als eine relative Isochronie darstellt, also als ein konstantes Verhältnis der Bewegungszeiten der Strecken untereinander und zur Gesamtfigur (Carter und Shapiro 1984), ließ sich in der vorgestellten Versuchsanordnung nicht bestätigen. Um einen möglichen asymptotischen Verlauf des Quotienten beurteilen zu können wäre eine höhere Zahl an Durchgängen notwendig.

Der wahrscheinlichste Grund für die nicht nachweisbare zeitliche Invarianz dürfte sein, daß durch die Trackingaufgabe, wie auch in einer Arbeit von Sobizak (1992), der ebenfalls keine Isochronie nachweisen konnte, die automatisierte Durchführung einer Bewegung durch die bewußte Kontrolle der Bewegung unterdrückt wurde (Mai und Marquardt 1995).

Zusätzlich wurde von Gordon und Ghez (1983) und Freund (1986) die zeitliche Invarianz hauptsächlich für die Phase der Kraftentwicklung einer Bewegung beschrieben. Die Variabilität einer Bewegung ist dagegen in der Zielphase am stärksten ausgeprägt, insbesondere bei wenig geübten Bewegungen. Es ist daher durchaus möglich, daß eine zeitliche Invarianz in den vorliegenden Daten während der Kraftentwicklung vorhanden war, jedoch aufgrund der Zeitmessung durch eine noch hohe Variabilität in der Endphase des jeweiligen Bewegungssegments nicht aufgedeckt werden konnte. Dafür spricht, daß eine signifikante Reduktion des Quotienten erst nach achtzig Durchgängen nachweisbar wurde, und die Isochronie meist an hochüberlernten Bewegungen untersucht worden ist.

Es wäre auch möglich, daß vierzig bzw. achtzig Übungsdurchgänge nicht genügen um eine Isochronie der Bewegungsabschnitte zu etablieren, da diese möglicherweise erst bei hochüberlernten Bewegungen zustande kommt. Daher waren Effekte dieses Prinzips der motorischen Bewegungsplanung möglicherweise in der vorliegenden Arbeit wegen der noch starken fokalvisuellen Kontrolle nicht nachweisbar.

Darüber hinaus wird das invariante Timing offenbar nicht perfekt sondern nur annähernd erreicht (Gentner 1987 und Heuer 1985), so daß von Heuer und Schmidt (1988) vorgeschlagen wurde, daß es sich nicht um ein notwendiges, sondern vielmehr um ein strategisches Phänomen handelt, das durch die Bevorzugung einer bestimmten zeitlichen Organisation verursacht wird.

Die Glättung (Mittelwertbildung) von Daten stellt eine artifizielle Veränderung der Daten dar, die jedoch verhindert durch noch deutlich schwankende Werten falsche Aussagen zu treffen. Um eine "natürliche" Reduktion der Schwankungen der Werte zu erreichen wäre ebenfalls eine wesentlich höhere Anzahl an Durchgängen erforderlich.

Insbesondere für die Untersuchung der Quotienten der Bewegungszeiten hat sich die Glättung der Daten aufgrund der ausgeprägten Schwankungen bewährt. Für die übrigen Parameter dürfte diese nicht notwendig sein.

Patienten

Wie zu erwarten, waren bei den meisten untersuchten Patienten die Durchführungszeiten länger als bei gesunden Probanden. Im Verlauf der Übung ließ sich jedoch auch für einige Patienten eine Verkürzung der benötigten Bewegungszeiten feststellen, die als reine Performancevariable allerdings nur Vermutungen über einen tatsächlichen Lernerfolg zuläßt.

Wie von Mai und Marquardt (1995) beschrieben, konnten auch bei motorisch beeinträchtigten Patienten zum Teil durchaus automatisierte Bewegungen aufgezeichnet werden. Da die nicht automatisierte Durchführung einer Bewegung bei täglich benötigten Bewegungen mehr behindert als eine bloße Verlangsamung, ist es sinnvoll, die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel für die klinische Untersuchung der Störung und für die Therapiekontrolle zu verwenden.

Für Patienten können positive Transfereffekte sowohl als erhaltene Leistung wie auch als "Transportmedium" einer erworbenen Leistung betrachten werden, die möglicherweise auch gezielt therapeutisch genutzt werden könnten. Bei den vorgestellten Patienten waren zum Teil keine Transfereffekte nachweisbar und zwar sowohl bei rein links- oder rechtshemisphärischen Störungen. Diese Tatsache läßt, wie oben erwähnt, leider kaum Schlußfolgerungen zu.

Ob die dafür benötigten Bahnen geschädigt wurden oder der Transfer aus anderen Gründen nicht stattfand, bleibt offen.

Bemerkenswert war, daß, wie im Fall von Patientin EG, das Verhältnis (Quotient) der Bewegungszeiten von der linken auf die rechte Seite erfolgreich übertragen wurde bei gleichzeitig nicht nachweisbaren Transfereffekten der Bewegungszeiten. Im Fall der Patientin bedeutet das, daß die komplexe zeitliche Kontrolle einer Bewegung in beiden Hemisphären unabhängig von der tatsächlichen Bewegungszeit erfolgreich programmiert wurde. Dies dürfte ein Hinweis auf die zusätzlich peripher verursachte Bewegungsstörung der Patientin sein.

Bei Patienten war meist nur eine geringe Reduktion des Quotienten nachzuweisen. Diese war jedoch unabhängig vom Vorhandensein einer Verkürzung der Bewegungszeiten und könnte wie bei Patient EG Hinweise zur Differenzierung zentraler von peripheren Bewegungsstörungen geben.

Für die Diagnose und Therapie von Bewegungsstörungen ist das Maß der Automatisierung sehr wichtig. Insofern ist es sicher günstiger möglichst alltagsübliche Bewegungen ohne zusätzliche Einschränkungen zu untersuchen, da die automatisierte Durchführung durch bewußte Kontrolle leicht zu unterdrücken ist (Mai und Marquardt 1995). Dies dürfte den wahrscheinlichsten Grund dafür darstellen, daß nur in Ausnahmefällen eine zeitliche Invarianz nachgewiesen werden konnte. Die Meßung der Isochronie im Rahmen einer Trackingaufgabe scheint jedenfalls für den klinischen Bedarf nicht sinnvoll. Ob sich dieser Parameter in einer relativ uneingeschränkten Aufgabe als aussagekräftig erweist bleibt noch zu untersuchen.

Um die diagnostische Aussagekraft zu erhöhen sollte die Aufgabenstellung von elementaren Handbewegungen über verschiedene Schreibbewegungen bis zu Bewegungen mit größerer Amplitude reichen, da diese vermutlich durch ihre räumliche Komponente unterschiedlich programmiert werden.

Abschließend kann man sicher sagen, daß es wichtig ist mehrere Parameter zur Operationalisierung heranzuziehen, um verschiedene Bereiche des Lernverlaufs abdecken und zusätzlich eine höhere Sicherheit zu gewährleisten um nicht nur Anpassungseffekte oder reine Performanceveränderungen sondern auch tatsächliches Lernen darzustellen.

Allerdings lassen sich auch mit den vorgestellten Parametern häufig nicht alle Komponenten einer Bewegungsstörung bestimmen und differenzieren.

Da nach wie vor sowohl über die Lateralisation motorischer Funktionen als auch über die zeitliche Programmierung von Bewegungen kein umfassendes und anerkanntes Konzept existiert sollte das Ziel zukünftiger Forschung ein besseres Verständnis der Mechanismen sein, die dem Zusammenspiel von Wahrnehmung und motorischer Kontrolle bei bestimmten zeitlichen Anforderungen zugrunde liegen.

5. Zusammenfassung

Eine wesentliche Dimension bei der Analyse von Bewegungen ist der Grad der Automation. Bewußt kontrollierte und automatisiert ablaufende Bewegungen können als Endpunkte eines Kontinuums verstanden werden, auf dem motorisches Lernen abgebildet werden kann. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, motorisches Lernen anhand der Parameter Reduktion der Durchführungszeit, Reduktion der Anzahl der Richtungswechsel im Geschwindigkeitsprofil (Automation) und der Entwicklung einer zeitlichen Invarianz (Entkoppelung der Durchführungszeit von der Bewegungsamplitude) an gesunden Probanden darzustellen. Zusätzlich wurde zur Kontrolle des motorischen Lernens der kontralaterale Transfer der Leistungen, also die Übertragung von Lerneffekten von einer Hand zur anderen, überprüft. Die Bewegungen der Probanden wurden während einer Trackingaufgabe an einem Graphiktablett aufgezeichnet und computergestützt analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, daß sich die Reduktion der Durchführungszeit und der Anzahl der Richtungswechsel im Geschwindigkeitsprofil insbesondere im Zusammenhang mit Transfereffekten gut zur Beobachtung motorischen Lernens eignen. Die Entwicklung einer zeitlichen Invarianz konnte im Rahmen dieser Trackingaufgabe nicht bestätigt werden. Das Ausmaß der kontralateralen Transfereffekte steht in Zusammenhang mit der Komplexität der Aufgabe und der Transferrichtung. Durch die räumliche Komponente der Aufgabe konnte eine bevorzugte Transferrichtung von der rechten Hemisphäre auf die linke Hemisphäre dargestellt werden.

Eine weitere Untersuchung an hirngeschädigte Patienten zeigte, daß die Differenzierung der durchaus unterschiedlichen Störungsmuster mit den oben beschriebenen Parametern verbessert werden kann und als Ausgangspunkt für ein systematisches Training geeignet ist.

6. Literaturverzeichnis

- Adams JA (1971) A closed - loop theory of motor learning.
J. of Mot. Behav. 3, 2, 111-149
- Adams JA (1987) Historical review and appraisal on the learning, retention and transfer of human motor skills. Psychol. Bulletin 101, 1, 41-74
- Alexander GE, Crutcher MD (1990) Functional architecture of basal ganglia circuits: neural substrates of parallel processing.
Trends Neurosci. 13, 7, 266-71
- Allen M (1983) Models of hemispheric specialisation.
Psychol. Bulletin 93, 1, 73-104
- Annett J, Golby CW, Kay H (1958) The measurement of elements in an assembly task - the information output of the human motor system.
Quart. J. of Exp. Psychol. 19, 1-11
- Annett J, Annett M, Hudson P, Turner A (1979) The control of movement in the preferred and non - preferred hand. J. of Exp. Psychol. 31, 641-652
- Arbib MA, Caplan D (1979) Neurolinguistics must be computational.
Behav. and Brain Sciences 2, 449-483
- Balfour CA, Clark CR, Geffen GM (1991) Interhemispheric differences in the planning and execution of sequences of skilled finger movements.
Neuropsychologia 29, 9, 889-905
- Bapi RS, Doya K, Harner AM (2000) Evidence for effector independent and dependent representation and their differential time course of acquisition during motor sequence learning. Exp. Brain Res. 132, 149-162
- Bernstein N (1967) The Co - ordination and regulation of movements.
Pergamon Press, NY
- Boecker H, Dagher A, Ceballos-Baumann AO, Passingham RE, Samuel M, Friston KJ, Poline JP, Dettmers C, Conrad B, Brooks DJ (1998) The role of human rostral SMA and the basal ganglia in motor sequence control: Investigations with H₂¹⁵O PET. J. Neurophysiol. 79, 1070-1080
- Bonda E, Petrides M, Frey S, Evans A (1995) Neural correlates of mental transformations of the body-in-space.
Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 92 (24) 11180-4
- Brenner E, Smeets JBJ (1997) Fast responses of the human hand to changes in target position. J. of Mot. Behav. 29, 4, 297-310
- Brooks VB (1986) The Neural Basis of Motor Control.
Oxford University Press, NY
- Büdingen J, Freund H-J (1976) The relationship between the rate of rise of isometric tension and motor unit recruitment in a human forearm muscle.
Pflügers Archiv 362, 61-67
- Burman K, Darian-Smith C, Darian-Smith I (2000) Macaque red nucleus: Origins of spinal and olivary projections and termination of cortical inputs.
J. Comp. Neurol. 423, 179-264
- Carlton LG (1980) Movement control characteristics of aiming responses.
Ergonomics 23, 1019-1032
- Carson GC, Chua R, Elliott D, Goodman D (1990) The contribution of vision to asymmetries in manual aiming. Neuropsychologia 28, 11, 1215-1220

- Carson RC (1989) Manual Asymmetries: Feedback processing, output variability, and spatial complexity - Resolving some inconsistencies. *J. of Mot. Behav.* 21, 1, 38-47
- Carter MC, Shapiro DC (1984) Control of sequential movements: Evidence for generalized motor programs. *J. of Neurophys.* 52, 5, 787-796
- Cohen G (1973) Hemisphere differences in serial versus parallel processing. *J. of Exper. Psychol.* 97, 3, 349-356
- Cohen AH, Rossignol S, Grillner S (1988)(Eds.) *Neural control of rhythmic movements in vertebrates.* Wiley, NY
- Coull JT, Frith CD (1998) Differential activation of right superior parietal cortex and intraparietal sulcus by spatial and nonspatial attention *Neuroimage* 8, 176-87
- Courchesne E, Allen G (1997) Prediction and preparation, fundamental functions of the cerebellum. *Learn. Mem.* 4, 1, 1-35.
- Cummings JL (1993) Frontal-subcortical circuits and human behavior. *Arch. Neurol.* 50, 873-880
- Cunnington R, Iansek R, Bradshaw JL, Phillips JG (1996) Movement-related potentials associated with movement preparation and motor imagery. *Exp. Brain Res.* 111, 3, 429-36
- Cunnington R, Windischberger C, Deecke L, Moser E (2002) The preparation and execution of self-initiated and externally-triggered movement: a study of event-related fMRI. *Neuroimage* 15, 2, 373-85
- Deecke L, Scheid P, Kornhuber HH (1969) Distribution of readiness potential, premotion positivity, and motor potential of the human cerebral cortex preceding voluntary finger movements. *Exp. Brain Res.* 7, 158-168
- Deecke L, Kornhuber HH, Lang W, Lang M, Schreiber H (1985) Timing function of the frontal cortex in sequential motor and learning tasks. *Human Neurobiol.* 4, 143-154
- Deiber M, Ibanez V, Honda M, Sadato N, Raman R, Hallet M (1998) Cerebral processes related to visuomotor imagery and generation of simple finger movements studied with PET. *Neuroimage* 7, 73-85
- Deiber M, Ibanez V, Honda M, Sadato N, Raman R, Hallet M (1999) Mesial motor areas in self-initiated versus externally triggered movements examined with fMRI: Effect of movement type and rate. *J. Neurophysiol.* 81, 3065-3077
- de Schonen S, Bry I (1987) Interhemispheric communication of visual learning: a developmental study in 3-6-month old infants. *Neuropsychologia* 25, 4, 601-12
- Derwort A (1938) Untersuchungen über den Zeitverlauf figurierter Bewegungen beim Menschen. *Pflügers Archiv* 240, 661-675
- Desmurget M, Epstein CM, Turner RS, Prablanc C, Alexander GE, Grafton ST (1999) Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to visual target. *Nat. Neurosci.* 2, 6, 563-7
- Desmurget M, Grafton ST (2000) Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends. Cogn. Sci.* 4,11, 423-31

- Doya K (2000) Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control. *Curr. Opin. Neurobiol.* 10, 6, 732-9
- Doyon J, Owen AM, Petrides M, Sziklas V (1996) Functional anatomy of visuomotor skill learning in human subjects examined with PET. *Eur. J. Neurosci* 8, 637-648
- Drenkow E (1960) Untersuchung über den Einfluß des beid- und einseitigen Übens auf die Leistung im Werfen. Dissertation, DHfK Leipzig
- Egger K (1975) Lernübertragung in der Sportpädagogik. Birkhäuser, Basel
- Elliott D, Chua R, Pollock BJ, Lyons J (1995) Optimising the use of vision in manual aiming: The role of practice. *Quart. J. of Exp. Psychol.* 48A, 1, 72-83
- Enoka RM (1983) Muscular control of a learned movement: The speed control system hypothesis. *Exp. Brain Res.* 51, 135-145
- Fechner GT (1858) Beobachtungen, welche zu beweisen scheinen dass durch die Uebung der Glieder der einen Seite die der andern zugleich mit geübt werden. *Ber. Sächs. Ges. Wiss., Leipzig, Math.-Phys. Cl.* 10, 70-76
- Fischer K (1979) Das Phänomen der Lateralität in der Sportpraxis. *Motorik* 2, 64-72
- Fitts PM (1954) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J. of Exp. Psychol.* 47, 6, 381-391
- Fitts PM, Peterson JR (1964) Information capacity of discrete motor responses. *J. of Exp. Psychol.* 67, 103-112
- Fleming D, Vossius GW, Bowman G, Johnson L (1969) Adaptive properties of the eye tracking system as revealed by head and open-loop studies. *Ann. NY Acad. Sciences* 156, 825-50
- Fletcher PC, Shallice T, Dolan RJ (1998) The functional roles of prefrontal memory in episodic memory. I Encoding. *Brain* 121, 1239-1248
- Flowers K (1975) Handedness and controlled movement. *Brit. J. of Psychol.* 66, 1, 39-55
- Fowler CA, Turvey MT (1978) Skill acquisition: An event approach with special reference to searching of the optimum of a function of several variables. in: *Information processing in motor control and learning.* Stelmach GE (Ed.) Academic Press, NY
- Franks IM, Stanley ML (1991) Learning the invariants of a perceptual motor skill. *Can. J. of Psychol.* 45, 3, 303-320
- Franz E, Eliassen J, Ivry R, Gazzaniga M (1996) Dissociation of spatial and temporal coupling in the bimanual movements of callosotomy patients. *Psychol. Sci.* 7, 306-310
- Freund H-J, Büdingen HJ (1978) The relation between speed and amplitude of the fastest voluntary contractions of human arm muscles. *Exp. Brain Res.* 31, 1-12
- Freund H-J (1986) Time control of hand movements. in: *Progress in brain research* 64. Freund HJ, Büttner U, Cohen B, Noth J (Eds.)
- Fries W (1997) Motorische Defizite nach Schlaganfall und Prognose der Funktionsrückbildung in Abhängigkeit von der Lokalisation der Infarkte. *Neurol. Reha.* 3, 4, 205-212
- Friston KJ, Frith CD, Passingham RE, Liddle PF, Frackowiak RSJ (1992) Motor practice and neurophysiological adaption in the cerebellum: a PET study. *Proc. R. Soc. Lond.* 248, 223-228

- Fuster JM (1989) The prefrontal Cortex. Raven Press, New York.
- Gentner DR (1987) Timing of skilled motor performance: tests of the proportional duration model. *Psychol. Rev.* 94, 2, 255-276
- Geschwind DH, Miller BL, DeCarli C, Carmelli D (2002). Heritability of lobar brain volumes in twins supports genetic models of cerebral laterality and handedness. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99, 5, 3176-81.
- Gielen CCAM, van den Oosten K, Pull ter Gunne F (1985) Relation between EMG activation and kinematic properties of aimed arm movements. *J. of Mot. Behav.* 17, 421-442
- Giuffrida CG, Shea JB, Fairbrother JT (2002) Differential transfer benefits of increased practice for constant, blocked, and serial practice schedules. *J. Mot. Behav.* 34 (4) 353-65
- Goldberg TE, Berman KF, Fleming K, Ostrem J, Van Hom JD, Esposito G, Mattay VS, Gold JM, Weinberger DR (1998) Uncoupling cognitive workload and prefrontal cortical physiology A PET study. *Neuroimage* 7, 296-303
- Gordon J, Ghez C (1987) Trajectory control in targeted force impulses: II. Pulse height control. *Exp. Brain Res.* 67, 241-252
- Gordon J, Ghez C (1987) Trajectory control in targeted force impulses: III. Compensatory adjustments for initial errors. *Exp. Brain Res.* 67, 253-69
- Godschalk M, Lemon RN, Nijs HGT, Kuypers HGJM (1981) Behavior of neurones in monkey peri-arcuate and precentral cortex before and during visually guided arm and hand movements. *Exp. Brain Res.* 44, 113-116
- Goldberg G (1985) Supplementary motor area structure and function: Review and hypotheses. *Behav. and Brain Sciences* 8, 567-616
- Grafton ST, Mazziotta JC, Woods RP, Phelps ME (1992) Human functional anatomy of visually guided finger movements. *Brain* 115, 2, 565-87
- Grafton ST, Hazeltine E, Ivry R (1995) Functional mapping of sequence learning in normal humans. *J. Cogn. Neurosci.* 7, 497-510
- Grafton ST, Arbib MA, Fadiga L, Rizzolatti G. (1996) Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. 2. Observation compared with imagination. *Exp. Brain Res.* 112, 1, 103-11
- Grafton ST, Hazeltine E, Ivry R (1998) Abstract and effectorspecific representations of motor sequences identified with PET. *J. Neurosci.* 18, 22, 9420-8
- Grafton ST, Hazeltine E, Ivry RB (2002) Motor sequence learning with the nondominant left hand. A PET functional imaging study. *Exp. Brain Res.* 146, 3, 369-78
- Graybiel AM (1998) The basal ganglia and chunking of action repertoires. *Neurobiol. Learn. Mem.* 70, 119-36
- Gruenewald C, Mecklinger A, Besson M, von Cramon DY (2000) Motor representation and their role in visual working memory. *J. Cogn. Neurosci. Suppl.* 143
- Guiard Y, Diaz G, Beaubaton D (1983) Left-hand advantage in right-handers for spatial constant error: preliminary evidence in a unimanual ballistic aimed movement. *Neuropsychologia* 21, 1, 111-115

- Gutman SR, Latash ML, Almeida GL, Gottlieb GL (1993) Kinematic description of variability of fast movements: analytical and experimental approaches. *Biol. Cybern.* 69, 485-492
- Haaland KY, Harrington DL (1989) The role of the hemispheres in closed loop movements. *Brain and Cognition* 9, 158-180
- Haaland KY, Harrington DL (1989) Hemispheric control of the initial and corrective components of aiming movements. *Neuropsychologia* 27, 7, 961-969
- Halsband, U (1992) Left hemisphere preponderance in trajectorial learning. *Neuroreport* 3, 397-400
- Halsband U, Freund H-J (1990) Premotor cortex and conditional learning in man. *Brain* 113, 207-222
- Hammond GE (1990) Manual performance asymmetries. in: *Cerebral control of speech and limb movements*, Hammond GE (Ed.) Elsevier, North Holland
- Hammond GE, Bolton YM (1982) Hemispheric differences in temporal resolution. *Brain and Cognition* 1, 95-118
- Hay L, Beaubaton D (1986) Visual correction of a rapid goal - directed response. *Percept. and Mot. Skills* 62, 51-57
- Helmuth LL, Ivry RB (1996) When two hands are better than one: reduced timing variability during bimanual movements. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 22, 2, 278-93
- Henry FM, Rogers DE (1960) Increased response latency for complicated movements and a "memory drum" theory of neuromotor reaction. *Res. Quart.* 31, 3, 448-45
- Heuer H (1985) Wie wirkt mentale Übung? *Psychol. Rundschau* 36, 191-200
- Heuer H, Schmidt RA (1988) Transfer of learning among motor patterns with different relative timing. *J. of Exp. Psychol: Perc. and Perfor.* 14, 241-252
- Hicks RE, Frank JM, Kinsbourne M (1982) The locus of bimanual skill transfer. *J. of General Psychol.* 107, 277-281
- Hikosaka O, Rand MK, Miyachi S, Miyashita K (1995) Learning of sequential movements in the monkey: process of learning and retention of memory. *J. Neurophysiol.* 74, 4, 1652-61
- Hikosaka O, Nakahara H, Rand MK, Sakai K, Lu X, Nakamura K, Miyachi S, Doya K (1999) Parallel neural networks for learning sequential procedures. *Trends Neurosci.* 22, 10, 464-71
- Hikosaka O. (2002) A new approach to the functional systems of the brain. *Epilepsia* 43, Suppl 9, 9-15
- Holowka S, Petitto LA (2002) Left hemisphere cerebral specialization for babies while babbling. *Science* 297, 5586, 1515
- Hoover JE, Strick PL (1993) Multiple output channels in the basal ganglia. *Science* 259, 819-821
- Iacoboni M (2001) Playing tennis with the cerebellum. *Nat. neurosci.* 4, 6, 555-6
- Ikeda A, Lüders HO, Burgess RC, Shibasaki H (1992) Movement-related potentials recorded from supplementary motor area and primary motor area. *Brain* 115, 1017-1043
- Imamizu H, Shimojo S (1995) The locus of visual-motor learning at the task or manipulator level: implications from intermanual transfer. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 21, 719-733

- Imamizu H, Miyauchi S, Tamada T, Sasaki Y, Takino R, Putz B, Yoshioka T, Kawato M (2000) Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature*. 403, 6766, 192-5
- Ivry RB, Keele SW, Diener HC (1988) Dissociation of the lateral and medial cerebellum in movement timing and movement execution. *Exp. Brain Res.* 73, 167-180
- Ivry R (1997) Cerebellar Timing System. *Int. Rev. Neurobiol.* 555-571
- Ivry RB, Hazeltine RE (1995) Perception and production of temporal intervals across a range of durations: evidence for a common timing mechanism. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 21, 1, 3-18
- Ivens CJ, Marteniuk RG (1997) Increased sensitivity to changes in visual feedback with practice. *J. of Mot. Behav.* 29, 2, 326-338
- Jenkins IH, Brooks DJ, Nixon PD, Frackowiak RS, Passingham RE (1994) Motor sequence learning: a study with PET. *J. Neurosci.* 14, 3775-3790
- Jueptner M, Stephan KM, Frith CD, Brooks DJ, Frackowiak RS, Passingham RE (1997) Anatomy of motor learning. I. Frontal cortex and attention to action. *J Neurophysiol.* 77, 3, 1313-24
- Jueptner M, Weiller C (1998) A review of differences between basal ganglia and cerebellar control of movements as revealed by functional imaging studies. *Brain* 121, 1437-49
- Karni A, Bertini G (1997) Learning perceptual skills: behavioral probes into adult cortical plasticity. *Curr. Opin. Neurobiol.* 7, 530-5
- Karni A, Meyer G, Rey-Hipolito C, Jezard P, Adams M, Turner R, Ungerleider LG (1998) The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 95, 861-8
- Katz D (1948) *Gestaltpsychologie*. Schwabe, Basel.
- Kawashima R, Roland PE, O'Sullivan BT (1995) Functional anatomy of reaching and visuomotor learning: a positron emission tomography study. *Cereb. Cortex.* 5, 2, 111-22
- Kawashima R, Matsumura M, Sadato N, Naito E, Waki A, Nakamura S, Matsunami K, Fukuda H, Yonekura Y (1998) Regional cerebral blood flow changes in human brain related to ipsilateral and contralateral complex hand movements - a PET study. *Eur. J. Neurosci.* 1, 7, 2254-60
- Keele SW, Posner MI (1968) Processing of visual feedback in rapid movements. *J. of Exp. Psych.* 77, 155-158
- Kermadi I, Joseph JP (1995) Activity in the caudate nucleus of monkey during spatial sequencing. *J. Neurophysiol.* 74, 3, 911-33
- Kerr R (1978) Diving, adaption, and Fitts law. *J. of Mot. Behav.* 10, 4, 255-266
- Kharraz-Tavakol OD, Eggert T, Mai N, Straube A. (2000) Learning to write letters: transfer in automated movements indicates modularity of motor programs in human subjects. *Neurosci. Lett.* 17, 282 (1-2) 33-6
- Kimura D (1977) Acquisition of a motor skill after left-hemisphere damage. *Brain* 100, 527-542
- Kleim JA, Cooper NR, VandenBerg PM (2002) Exercise induces angiogenesis but does not alter movement representations within rat motor cortex. *Brain Res.* 26, 934 (1) 1-6

- Koechlin E, Danek A, Burnod Y, Grafman J (2002) Medial prefrontal and subcortical mechanisms underlying the acquisition of motor and cognitive action sequences in humans. *Neuron* 18, 35 (2) 371-81
- Kommerel G, Klein U (1971) Über die visuelle Regelung der Okulomotorik: die optomotorische Wirkung exzentrischer Nachbilder. *Vision Research* 11, 905-920
- Kuhn W (1986) Kontralateraler Transfer: Befunde und theoretische Erläuterungsansätze. *Sportwissenschaften* 16, 4, 422-442
- Kunesch E, Binkovski F, Freund H-J (1989) Invariant temporal characteristics of manipulative hand movements. *Exp. Brain Res.* 78, 539-546
- Lai Q, Shea CH, Wulf G, Wright DL (2000) Optimizing generalized motor program and parameter learning. *Res. Quart. Exerc. Sport* 7, 1, 10-24
- Lashley KS (1917) The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ. *Am. J. Physiol.* 43, 169-194
- Ledlow, A (1976) A reaction against time and evoked potential investigation of lateral asymmetries in a stimulus classification task. Unpublished doctoral dissertation, Univ. Austin, Texas
Zitiert nach: Carson (1990) The contribution of vision to asymmetries in manual aiming. *Neuropsychologia*, 28, 11, 1215-1220
- Lee KM, Chang KH, Roh JK (1999) Subregions within the supplementary motor area activated at different stages of movement preparation and execution. *Neuroimage* 9, 1, 117-23
- Leist A, Freund H-J, Cohen B (1987) Comparative characteristics of predictive eye-hand tracking. *Hum. Neurobiol.* 6, 19-26
- Leuthold H, Jentzsch I (2001) Neural correlates of advanced movement preparation: a dipole source analysis approach. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 12, 2, 207-24
- Llinas RR (1988) The intrinsic electrophysiological properties of mammalian neurones: insight into central nervous system function. *Science*, 242, 1654-1664
- Lomas J (1980) Competition within the left hemisphere between speaking and unimanual tasks performed without visual guidance. *Neuropsychologia* 18, 141-149
- Mack L, Rothi L, Heilman K (1993) Hemispheric specialization for handwriting in right handers. *Brain and Cognition* 21, 80-86
- Mai N, Marquard C, Zahn W (1992) CS Version 4.1 Bedienungshandbuch. Computerunterstützte Analyse der Bewegungsabläufe beim Schreiben. Schwäbisch Gmünd.
- Mai N, Marquardt C (1995) Analyse und Therapie motorischer Schreibstörungen. *Psychologische Beiträge* 37, 538-582
- Mai N, Blaut M, Hermsdörfer J (1993) Handfunktionen. in: *Neuropsychologische Diagnostik.* von Cramon D, Mai N, Ziegler W (Hrsg.) VCH Edition Medizin, Weinheim
- Marquardt C, Mai N (1994) A computational procedure for movement analysis in handwriting. *J. Neurosci. Methods.* 52, 1, 39-45
- Marquardt C, Gentz W, Mai N (1996) On the role of vision in skilled handwriting. in: *Handwriting and drawing research: Basic and applied issues*, Simner SI, Leedham CG, Thomassen AJWM (Eds.) IOS Press, Nijmegen

- Marquardt C, Gentz W, Mai N (1999) Visual control of automated handwriting movements. *Exp. Brain. Res.* 128, 224-8
- Marsden CD (1982) The mysterious motor function of the basal ganglia: The Robert Wartenberg lecture. *Neurol.* 323, 514-539
- Marsden CD (1987) What do the basal ganglia tell premotor cortical areas? *Ciba Found. Symp.* 132, 282-300
- Mather JA, Puchat C (1983) Parallel ocular and manual tracking responses to a continuously moving visual target. *J. of Mot. Behav.* 15, 1, 29-38
- Mather JA, Lackner JR (1980) Visual tracking of active and passive movements of the hand. *Quart. J. of Exp. Psychol.* 32, 307-315
- Matsumoto N, Hanakawa T, Maki S, Graybiel AM, Kimura M (1999) Role of [corrected] nigrostriatal dopamine system in learning to perform sequential motor tasks in a predictive manner. *J. Neurophysiol.* 82, 2, 978-98
- McCracken D, Stelmach GE (1978) A test of the Schema theory of discrete motor learning in: *Information processing in motor control and learning*. Stelmach GE (Ed.) Academic Press, NY
- McGeoch JA (1929) The acquisition of skill. *Psychol. Bulletin* 26, 8, 457-498
- McGlone J (1980) Sex differences in human brain asymmetry: a critical survey. *Behav. and Brain Sciences* 3, 215-263
- Meck WM (1996) Neuropharmacology of timing and time perception *Cogn. Brain Res.* 3, 227-242
- Meulenbroek RG, Rosenbaum DA, Thomassen AJ, Loukopoulos LD, Vaughan J (1996) Adaption of a reaching model to handwriting: How different effectors can produce the same written output, and other results. *Psychol. Res.* 59, 64-74
- Middleton FA, Strick PL (2000) Basal ganglia and cerebellar loops: motor and cognitiv circuits. *Brain. Res. Rev* 31, 236-250
- Miller GA (1956) The magic number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychol. Rev.* 63, 81-97
- Miller EK (2000) The prefrontal cortex and cognitive control. *Nat. Rev. Neurosci.* 1, 1, 59-65
- Milner TE, Ijaz MM (1990) The effect of accuracy constraints on three-dimensional movement kinematics. *Neuroscience* 35, 2, 365-374
- Milner TE (1992) A model for the generation of movements requiring endpoint precision. *Neuroscience* 49, 2, 487-496
- Miyachi S, Hikosaka O, Miyashita K, Karadi Z, Rand MK (1997) Differential roles of monkey striatum in learning of sequential hand movement. *Exp. Brain Res.* 115, 1, 1-5
- Moscovitch M (1979) Information Processing and the cerebral hemispheres. in: *Handbook of behavioral neurobiology*, Vol. 2. Gazzaniga M (Ed.) Plenum Press, NY
- Muellbacher W, Ziemann U, Wissel J, Dang N, Kofler M, Facchini S, Boroojerdi B, Poewe W, Hallett M (2002) Early consolidation in human primary motor cortex. *Nature* 415, 6872, 640-4
- Müller RA, Kleinhans N, Pierce K, Kemmotsu N, Courchesne E (2002) Functional MRI of motor sequence acquisition: effects of learning stage and performance. *Cogn. Brain Res.* 14, 277-293

- Nagel S (1983) Die Bedeutung der symmetrischen Ausbildung für den Sportunterricht. Sportunterricht 32, 5-12
- Nagy G (1972) Zum Zusammenhang zwischen Übung und Transfer beim motorischen Lernen. Sportwissenschaft 2, 423-428
- Nakahara H, Doya K, Hikosaka O (2001) Parallel cortico-basal ganglia mechanisms for acquisition and execution of visuomotor sequences - a computational approach. J. Cogn. Neurosci. 13 (5) 626-47
- Nakamura K, Sakai K, Hikosaka O (1998) Neuronal activity in medial frontal cortex during learning of sequential procedures. J. Neurophysiol. 80, 2671-2687
- Newell KM (1991) Motor skill acquisition. Ann. Rev. Psychol. 42, 213-237
- von Noorden G, Mackensen G (1962) Pursuit movements of normal and amblyoptic eyes. Physiology of pursuit movements. Am. J. Ophthalm. 53, 325-336
- Oldfield RC (1971) The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. Neuropsychologia 9, 97-114
- Park JH, Shea CH (2003) Effect of practice on effector independence. J. Mot. Behav. 35, 1, 33-40
- Passingham RE, Jueptner M, Frith C, Brooks RJ, Frackowiak RJ (1995) An analysis of motor learning. Hum. Brain Map., Suppl. 1, 410
- Passingham RE (1996) Functional specialization of the supplementary motor area in monkeys and humans. In: Advance in Neurology, Vol. 70: Supplementary sensorimotor area. Luders HO (Ed.) pp.105-116, Lippincott-Raven, Philadelphia
- Pear TH (1927) Skill. J. of Personnel Research, 5, 478-489
- Peters M (1980) Why the preferred hand taps more quickly than the non-preferred hand: three experiments on handedness. Can. J. Psychol. / Rev.Canad. Psychol, 34, 1, 62-71
- Peters M (1989) Do feedback processing, output variability and spatial complexity account for manual asymmetry? J. of Mot. Behav. 21, 151-155
- Pickard N, Strick PL (1996) Motor areas of the medial wall: A review of their location and functional activation. Cerebr. Cortex 6, 342-353
- Plamondon R (1991) On the origin of the asymmetric bell-shaped velocity profiles in rapid aimed movements. in: Tutorials in motor neuroscience. Requin J, Stelmach GE (Eds.), Kluwer, Dordrecht
- Plamondon R (1995) A kinematic theory of rapid human movement. I. Movement representation and generation. II. Movement time control. Biol. Cybern. 72, 295-320
- Prinz W, Sanders AF (1984) Cognition and motor processes. Springer, Berlin
- Prosiegel M (1988) Beschreibung der Patientenstichprobe einer neuropsychologischen Rehabilitationsklinik. in: Neuropsychologische Rehabilitation. von Cramon D, Zihl J (Eds.), Springer, Berlin
- Puretz SL (1983) Bilateral transfer: The effects of practice on the transfer of complex dance movement patterns. Res. Quart. Exerc. and Sport, 54, 1, 48-54
- Raichle, ME (2003) Functional brain imaging and human brain function. J. Neurosci. 23, 10, 3959-62.

- Rao SM, Harrington DL, Haaland KY, Bobholz JA, Cox RW, Binder JR (1997) Distributed neural systems underlying the timing of movements. *J. Neurosci.* 17, 14, 5528-35
- Richter W, Andersen PM, Georgopoulos AP, Kim SG (1997) Sequential activity in human motor areas during a delayed cued finger movement task studied by time resolved fMRI. *Neuroreport* 8, 1257-1261
- Rioult-Pedotti MS, Friedman D, Donoghue JP (2000) Learning-induced LTP in neocortex. *Science* 290, 5491, 533-6
- Rizzolatti G, Luppino G, Matelli M (1996) The classic SMA is formed by two independent areas in: *Advance in Neurology*, Vol. 70: Supplementary sensorimotor area. Lunders HO (Ed.) pp.45-56, Lippincott-Raven, Philadelphia
- Rizzolatti G, Gentilucci M, Fogassi L, Luppino G, Matelli M, Ponzoni-Maggi S (1987) Neurons related to goal-directed motor acts in inferior area 6 of the macaque monkey. *Exp. Brain Res.* 67, 1, 220-4
- Rao SM, Binder JR, Bandettini PA, Hammeke TA, Yetkin FZ, Jesmanowicz A, Lisk LM, Morris GL, Mueller WM, Estkowski LD, et al. (1993) Functional magnetic resonance imaging of complex human movements. *Neurology* 43, 11, 2311-8.
- Roland PE, Larsen B, Lassen NA, Skinhøj E (1980) Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *J. of Neurophys.* 43, 1, 118-136
- Rosenbaum DA (1991) *Drawing and writing in: Human Motor Control*. Rosenbaum DA (Ed.) Academic Press, London
- Rosenbaum DA, Loukopoulos LD, Engelbrecht SE, Meulenbroek RG, Vaughan J, Engelbrecht SE (1995) Planning reaches by evaluating stored postures. *Psychol. Rev.* 102, 1, 28-67
- Rostomily RC, Berger MS, Ojeman GA, Lettich E (1991) Postoperative deficits and functional recovery following removal of tumors involving the dominant hemisphere supplementary motor area. *J. of Neurosurgery* 75, 62-68
- Rothwell JC, Traub MM, Day BL, Obeso JA, Thomas PK (1982) Manual motor performance in a deafferented man. *Brain* 105, 515-542
- Rouiller EM, Babalian A, Kazzenikov O, Moret V, Yu YH, Wiesendanger M (1994) Transcallosal connections of the distal forelimb representations of the primary and supplementary motor cortical areas in macaque monkeys. *Exp. Brain Res.* 102, 227-243
- Rowe J, Friston K, Frackowiak R, Passingham R (2002) Attention to action: specific modulation of corticocortical interactions in humans. *Neuroimage* 17, 2, 988-98
- Roy EA, MacKenzie C (1978) Handedness effects in kinaesthetic spatial location judgements. *Cortex* 14, 250-258
- Roy EA, Elliot D (1986) Manual asymmetries in visually directed aiming. *Canad. J. of Psychol.* 40, 2, 109-121
- Roy EA, Elliot D (1989) Manual asymmetries in aimed movements. *J. of Exp. Psychol.* 41A, 3, 501-516
- Roy EA, Kalbfleisch L, Elliott D (1994) Kinematik analysis of manual asymmetries in visual aiming movements. *Brain and Cogn.* 24, 289-295
- Rumelhard DE, Norman DA (1982) Simulating a skilled typist: A study of skilled cognitive motor performance. *Cognitive Science* 6, 1-36.

- Sadato N, Campbell G, Ibanez V, Deiber M, Hallett M (1996) Complexity affects regional cerebral blood flow change during sequential finger movements. *J. Neurosci.* 16, 8, 2691-700
- Sainsburg RL, Wang J (2002) Interlimb transfer of visuomotor rotations: independence of direct and final end position information. *Exp. Brain Res.* 145, 437-447
- Sakai K, Hikosaka O, Miyauchi S, Takino R, Sasaki Y, Putz B (1998) Transition of brain activation from frontal to parietal areas in visuomotor sequence learning. *J. Neurosci.* 18, 5, 1827-40
- Sakai K, Hikosaka O, Takino R, Miyauchi S, Nielsen M, Tamada T (2000) What and when: parallel and convergent processing in motor control. *J. Neurosci.* 20, 2691-2700
- Sakata H, Taira M, Kusunoki M, Murata A, Tanaka Y (1997) The TINS lecture: parietal association cortex in depth perception and visual control of hand action. *Trends Neurosci* 20, 8, 350-7
- Sanes JN, Dimitrov B, Hallett M (1990) Motor learning in patients with cerebral dysfunction. *Brain* 113, 103-120
- Sanes JN, Mauritz M, Dalakas MC, Evarts EV (1985) Motor control in humans with large fiber sensory neuropathy. *Human Neurobiol.* 4, 101-114
- Schmidt RA (1975) A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychol. Rev.* 82, 225-260
- Schmidt RA (1988) Motor control and motor learning. *Human Kinetics, Champaign*
- Schmidt RA, Zelaznik HN, Frank JS (1978) Sources of inaccuracy in rapid movements. in: *Information processing in motor control and learning.* Stelmach G.E. (Ed.) Academic Press, NY
- Schmidt RF, Wieselndanger M (1985) Motorische Systeme. in: *Physiologie des Menschen*, Schmidt RF, Thews G (Hrsg.) Springer, Berlin
- Schubotz RI, von Cramon DY. (2001) Interval and ordinal properties of sequences are associated with distinct premotor areas. *Cereb. Cortex* 11, 3, 210-22
- Schultz W, Dayan P, Montague PR (1997) A neural substrate of prediction and reward. *Science* 275, 1593-1599
- Searle LV, Taylor FV (1948) Studies of tracking behavior: Rate and time characteristics of simple corrective movements. *J. of Exp. Psychol.* 38, 615-631
- Seitz RJ, Canavan AG, Yaguez L, Herzog H, Tellmann L, Knorr U, Huang Y, Homberg V (1994) Successive roles of the cerebellum and premotor cortices in trajectorial learning. *Neuroreport.* 20, 5, 18, 2541-4
- Seitz RJ, Canavan AG, Yaguez L, Herzog H, Tellmann L, Knorr U, Huang Y, Homberg V. (1997) Representations of graphomotor trajectories in the human parietal cortex: evidence for controlled processing and automatic performance. *Eur. J. Neurosci.* 9, 2, 378-89
- Semmes J (1968) Hemispheric specialization: A possible clue to mechanism. *Neuropsychologia*, 6, 11-26
- Seth G (1973) Eye-hand coordination and "handedness": A developmental study of visuomotor behaviour in infancy. *Brit. J. Edu. Psychol.* 43, 35-49
- Shapiro DC (1977) A preliminary attempt to determine the duration of a motor program. in: *Psychology of motor behaviour and sport.* Landers DM, Christina RW Eds.) *Human Kinetics, Champaign*

- Shadmehr R, Holcomb HH. (1997) Neural correlates of motor memory consolidation. *Science*. 277, 5327, 821-5
- Shapiro DC, Zernicke RF, Gregor RJ, Diestel JD (1981) Evidence for generalized motor programs using gait pattern analysis. *J. of Mot. Behav.* 13, 1, 33-47
- Slater-Hammel AT (1951) Transfer of exercise as a therapeutic tool. *J. of Phys. Ment. Rehab.* 4, 24-26
- Smith WM, Bowen KF (1980) The effect of delayed and displaced visual feedback. *J. of Mot. Behav.* 12, 91-101
- Sobizack N (1992) Motorisches Lernen bei neuropsychologischen Patienten. Diplomarbeit Psychologie, Konstanz
- Soechting JF, Flanders M (1997) Flexibility and repeatability of finger movements during typing: Analysis of multiple degrees of freedom *J. Comput. Neurosci.* 4, 1, 29-46
- Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, Frackowiak RS (1995) Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J. Neurophysiol.* 73, 1, 373-86
- Stephan KM, Thaut MH, Wunderlich G, Schicks W, Tian B, Tellmann L, Schmitz T, Herzog H, McIntosh GC, Seitz RJ, Homberg V (2002) Conscious and subconscious sensorimotor synchronization-prefrontal cortex and the influence of awareness. *Neuroimage* 15, 2, 345-52
- Strauss E, Kosaka B, Wada J (1983) The neurobiological basis of lateralized cerebral function. A review. *Human Neurobiol.* 2, 115-127
- Stoddard J, Vaid J (1996) Asymmetries in intermanual transfer of maze learning in right- and lefthanded adults. *Neuropsychologia* 34, 605-8
- Summers JJ (1977) The relationship between the sequencing and timing components of all skills. *J. of Mot. Behav.* 9, 1, 49-59
- Tanji J, Okano K, Sato KC (1988) Neuronal activity in cortical motor areas related to ipsilateral, contralateral, and bilateral digit movements of the monkey. *J. Neurophysiol.* 60, 1, 325-43
- Taylor FV, Birmingham HP (1948) Studies of tracking behavior: The acceleration pattern of quick manual tracking responses. *J. of Exp. Psychol.* 38, 783-795
- Teixeira LA (2000) Timing and force components in bilateral transfer of learning. *Brain Cogn.* 44, 455-469
- Terzuolo CA, Viviani P (1979) The central representation of learned motor patterns. in: *Posture and movement*, Talbot RE, Humphrey DR (Eds.) Raven Press, NY
- Terzuolo CA, Viviani P (1980) Determinants and characteristics of motor patterns used for typing. *Neuroscience* 5, 1085-1103
- Thorndike EL (1927) The law of effect. *Am. J. of Psychol.* 39, 212-222
- Todor JI, Doane TH (1978) Handedness and hemispheric asymmetries in the control of movements. *J. of Mot. Behav.* 10, 4, 295-300
- Todor JI, Cisneros J (1985) Accommodation to increased accuracy demands by the right and left hands. *J. of Mot. Behav.* 17, 355-372
- Todor JI, Smiley-Oyen AL (1987) Force modulation as a source of hand differences in rapid finger tapping. *Acta Psychol.* 65, 65-73

- Toni I, Krams M, Turner R, Passingham RE (1998) The time course of changes in motor sequence learning: a whole brain fMRI study. *Neuroimage* 8, 50-61
- Toni I, Rowe J, Stephan KE, Passingham RE (2002) Changes of cortico-striatal effective connectivity during visuomotor learning. *Cereb. Cortex* 2002, 12, 10, 1040-7
- Trevarthen C (1968) Two mechanisms of vision in primates. *Psychol. Forschung*, 31, 299-337
- van Galen GP, Teulings HL, Sanders J (1994) On the interdependence of motor programming and feedback processing in handwriting. In: *Advances in handwriting and drawing*, Faure C, Keuss P, Lorette G, Vinter A (Eds.) Europia, Paris, pp 403-419
- van Mier H, Tempel LW, Perlmutter JS, Raichle ME, Petersen SE (1998) Changes in brain activity during motor learning measured with PET: effects of hand of performance and practice. *J. Neurophysiol.* 80, 4, 2177-99
- Viviani P, Terzuolo C (1982) Trajectory determines movement dynamics. *Neuroscience* 7, 2, 431-437
- Wallace SA, Wright L (1982) Distance and movement time effects on the timing of agonist and antagonist muscles: A test of the impulse-timing theory. *J. of Mot. Behav.* 14, 4, 341-352
- Welford GM (1968) *Fundamentals of skill*. Methuen, London
- Witelson SF, Kigar DL (1988) Anatomical development of corpus callosum in humans: A review with reference to sex and cognition. In: Molfese DL, Sagalowicz SJ (eds.) *Brain Lateralisation in Children: Developmental Implications*. New York: Guilford Press, 35-57
- Wolpert DM, Ghahramani Z, Jordan MI (1995) Are arm trajectories planned in kinematic or dynamic coordinates? An adaptation study. *Exp. Brain Res.* 103, 3, 460-70
- Woodworth RS (1899) The accuracy of voluntary movements. *Psychol. Review* 3, 2 (13) 1-114
- Wulf G, Schmidt RA, Deubel HJ (1993) Reduced feedback frequency enhances generalized motor program learning but not parameterization learning. *Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 19, 5, 1134-50
- Wyke M (1968) The effect of brain lesions in the performance of an arm-hand precision task. *Neuropsychologia* 6, 125-134
- Zelaznik HN, Hawkins B, Kisselburg L (1983) Rapid visual feedback processing in single-aimed movements. *J. of Mot. Behav.* 15, 3, 217-236
- Zihl J (1988) *Methodische Voraussetzungen der neuropsychologischen Rehabilitation*. in: *Neuropsychologische Rehabilitation*. von Cramon D, Zihl J (Hrsg.) Springer, Berlin

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name:	Eva Maria Hendrich
geboren:	28. 01. 1967
Staatsangehörigkeit	deutsch
Vater:	Rudolf Hendrich
Mutter:	Barbara Hendrich, geb. Huber

Ausbildung:

1973 - 1977	Grundschule in München
1977 - 1988	Gymnasium in München
1988 - 1996	Studium der Medizin an der Ludwig - Maximilians - Universität in München

Berufstätigkeit:

Juli 1996 - Dez 1997	ÄIP in der Klinik für Neurochirurgie am KH Bogenhausen
Mai 1998 - Nov 1998	Assistenzärztin für Innere Medizin in der Fachklinik Lenggries
Dez 1998 - Nov 2000	Assistenzärztin im BKH Haar, Abt. für Neuroradiologie
Dez 2000 - Juli 2003	Assistenzärztin für Radiologie an der BG Unfallklinik Murnau
seit Aug 2003	Assistenzärztin für Radiologie an der Friedrich - Alexander - Universität Erlangen / Nürnberg

Danksagung

Großer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. Ernst Pöppel für die freundliche Unterstützung meiner Dissertationsarbeit.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr. Josef Ilmberger für seine äußerst wertvollen Hilfestellungen, die er mir mit Geduld entgegenbrachte. Er unterstützte mich durch hilfreiche Ratschläge in der Gestaltung der Studie, bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse und durch kritische Sichtung der Arbeit. Seine Hilfe trug wesentlich zum Gelingen meiner Dissertation bei.

Für die technische Unterstützung bei der Auswertung der Ergebnisse möchte ich Herrn Christian Marquardt, einem der Urheber des Computerprogramms „CS“, ganz herzlich danken. Ohne dieses Programm wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ganz herzlich möchte ich auch Frau Dr. rer. nat. Eva Heuberger für die durchaus kritische und sehr hilfreiche Sichtung meiner Arbeit danken.